

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**DOPRAVNÍ SYSTÉMY NA BÁZI MAGNETICKÉ  
LEVITACE**  
**TRANSPORT SYSTEMS ON THE BASE OF MAGNETIC  
LEVITATION**

**2013**

**Oldřich Rychlý**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Oldřich Rychlý**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

**Dopravní systémy na bázi magnetické levitace**  
**Transport systems on the base of magnetic levitation**

Zásady pro vypracování:

1. Historický vývoj kolejové dopravy
2. Princip dopravních systémů na bázi magnetické levitace
3. Zásadní elektrické části vozidel a tratí s magnetickou levitací
4. Systém Transrapid
5. Budoucnost dopravy na bázi magnetické levitace

1. Historical development of rail transport
2. Principle of transport systems on the basis magnetic levitation
3. The fundamental electrical parts of the vehicles and tracks with magnetic levitation
4. The system Transrapid
5. The future of transport on the basis of magnetic levitation

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Studijní materiály K 420, [http://feil.vsb.cz/kat420/index\\_stary.html](http://feil.vsb.cz/kat420/index_stary.html)  
[2] Firemní literatura SIEMENS  
[3] Paleček, J.; Paleček, L.: TRANSRAPID-nová dimenze v dopravní technologii, Nová železniční technika 1/1998

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

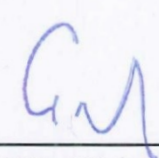
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

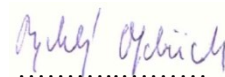


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7. 5. 2013

Handwritten signature in blue ink, appearing to read "Petr Dvorník".

.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá principy dopravy na bázi magnetické levitace a pohonným systémem tohoto způsobu dopravy. Práce obsahuje možnosti způsobů dosažení magnetické levitace pomocí magnetického pole a zároveň aplikace jednotlivých způsobů v praxi. Podrobněji se zabývá elektromagnetickou levitací, respektive její aplikací v systému Transrapid. Následně je podrobněji rozebrán právě systém Transrapid z pohledu dopravního i z pohledu elektrického pohonu. V závěru práce je uvedeno zhodnocení a prognóza magneticky levitovaných systémů, jejich uplatnění ve světě a dynamika rozvoje tratí, které pracují právě na tomto principu.

## **Klíčová slova**

Magnetická levitace (MAGLEV), elektrodynamická levitace (EDS), elektromagnetická levitace (EMS), lineární motor, elektromagnet, Inductrack, Transrapid, Halbachova soustava

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with principles of transport systems on the base of magnetic levitation and propulsions system of this way of transport. This thesis contains ways how magnetic levitation can be achieved due to magnetic field and applications of these ways of magnetic levitation in real use. In detail, this thesis describe electromagnetic levitation, or more precisely deals with its application in system Transparid. Subsequently, the system Transrapid is analyzed more thoroughly from transport view and from electric propulsion view. In conclusion, there is an evaluation and prognosis of the magnetic levitating systems, their use in the world and movement of the development of the tracks that work on this princip.

## **Key words**

Magnetic levitation (MAGLEV), elektrodynamic suspension (EDS), elektromagnetic suspension (EMS), linear motor, electromagnet, Inductrack, Transrapid, Halbach Array

## Seznam symbolů a značek

$F_g$	(N)	gravitační síla
$F_m$	(N)	síla elektromagnetu
$I_b$	(A)	budící proud cívkou elektromagnetu
$\delta$	(m)	vzduchová mezera mezi elektromagnetem a magnetickou dráhou
$F$	(Hz)	frekvence
$F_I$	(N)	odpudivá síla mezi supravodivou cívkou a pevnou cívkou
$F_b$	(N)	brzdící síla
$v$	( $m \cdot s^{-1}$ )	rychlost vozidla
$B_C$	(H)	kritická indukce
$T$	(K)	teplota
$T_C$	(K)	kritická teplota
$v_s$	( $m \cdot s^{-1}$ )	lineární synchronní rychlost
$w$	(m)	rozteč mezi cívkami
$F_1$	(N)	síla vybuzená elektromagnetem pro krátkodobé zatížení
$F_2$	(N)	síla vybuzená elektromagnetem pro dlouhodobé zatížení
$F_{max}$	(N)	maximální síla elektromagnetu
$v_1$	( $m \cdot s^{-1}$ )	provozní rychlost pro krátkodobé zatížení
$v_2$	( $m \cdot s^{-1}$ )	provozní rychlost pro dlouhodobé zatížení
$v_0$	( $m \cdot s^{-1}$ )	maximální teoretická rychlost při nulové levitační síle
$F_m$	(N)	magnetomotorická síla elektromagnetu
$U_M$	(V)	magnetické napětí
$\Phi$	(V·s)	magnetický tok
$R_M$	( $\Omega$ )	magnetický odpor
$\Psi$	(V·s)	spřažený magnetický tok elektromagnetu
$l_{min}$	(m)	minimální vzdálenost elektromagnetu od magnetické dráhy
$l_{max}$	(m)	maximální vzdálenost elektromagnetu od magnetické dráhy
MAGLEV		magnetická levitace
Transrapid		vlak využívající principu EMS
EMS		elektromagnetická levitace
EDS		elektrodynamická levitace
Inductrack		levitační princip na bázi Halbachovy soustavy
JR		Japonské železnice
JAL		Japonské aerolinie
ICE		vysokorychlostní vlak Intercity-Expres

## Obsah:

1	Úvod.....	1
2	Historický vývoj kolejové dopravy .....	2
3	Princip dopravních systémů na bázi magnetické levitace .....	4
3.1	EMS (Electro-Magnetic Suspension).....	4
3.2	EDS (Electro-Dynamic Suspension).....	7
3.3	Inductrack.....	8
3.4	Porovnání systému EDS a EMS.....	9
4	Transrapid .....	11
4.1	Technické parametry Transrapidu.....	12
4.2	Řízení transrapidu (OTN, dálkové).....	13
4.3	Princip .....	13
4.4	Jízdní dráha .....	14
4.5	Přednosti transrapidu.....	15
5	Zásadní elektrické části vozidel a tratí s magnetickou levitací .....	18
5.1	Lineární synchronní motor .....	18
5.1.1	Konstrukce .....	19
5.1.2	Princip činnosti.....	19
5.2	Elektromagnet .....	22
5.2.1	Konstrukce .....	22
5.2.2	Princip .....	22
5.2.3	Síla ve vzduchové mezeře .....	23
5.2.4	Návrh stejnosměrného elektromagnetu.....	24
6	Budoucnost dopravy na bázi magnetické levitace .....	27
6.1	Projekty v provozu .....	27
6.1.1	Šanghaj.....	27
6.2	Plánované projekty v Asii .....	29
6.2.1	Chūō Shinkansen.....	29
6.2.2	Vakuové vlaky .....	29
6.3	Plánované projekty v Evropě .....	30
6.3.1	Hamburg – Berlín.....	30
6.3.2	Londýn – Peking .....	30



6.4	Rozvoj supravodivých materiálů.....	30
7	Závěr .....	32

## Seznam obrázků:

<b>Obr 3.1</b> Princip Elektromagnetické levitace.....	5
<b>Obr 3.2</b> Závislost síly na vzduchové mezeře při různých budících proudech.....	5
<b>Obr 3.3</b> Řízení pomocí fotoelektrického článku .....	6
<b>Obr 3.4</b> R.O. pomocí střídavého elektromagnetu a graf závislost proudu na frekvenci .....	6
<b>Obr 3.5</b> Princip Elektrodynamické levitace .....	7
<b>Obr 3.6</b> Závislost kritické indukce na teplotě .....	8
<b>Obr 3.7</b> Halbachova soustava permanentních magnetů .....	8
<b>Obr 3.8</b> Magnetické pole Halbachovy soustavy permanentních magnetů .....	9
<b>Obr 4.1</b> Uspořádání levitační, stabilizační a pohonné části systému Transrapid .....	11
<b>Obr 4.2</b> Intenzita hluku ve vzdálenosti 25m od zdroje.....	16
<b>Obr 4.3</b> Zásah do krajiny (zastavěná plocha na jednotku délky) .....	16
<b>Obr 4.4</b> Spotřeba elektrické energie.....	17
<b>Obr 4.5</b> Intenzita magnetického pole .....	17
<b>Obr 5.1</b> Konstrukční celky lineárního indukčního motoru.....	19
<b>Obr 5.2</b> Princip působení lineárního synchronního motoru .....	20
<b>Obr 5.3</b> Grafická závislost síly na rychlosti pohybu – charakteristika LSM.....	21
<b>Obr 5.4</b> Závislost spřaženého magnetického toku na proudu budícím vinutím elmag. ....	23
<b>Obr 6.1</b> Magnetická dráha v Šanghaji s naznačeným plánovaným rozšířením.....	28
<b>Obr 6.2</b> Transrapid 08(Europa) na trati v Šanghaji .....	28
<b>Obr 6.3</b> Magnetická dráha v Japonsku s naznačeným plánovaným rozšířením.....	29

## **1 Úvod**

Bakalářská práce je zaměřena na moderní způsob dopravy magneticky levitovanými vlaky. Práce se zabývá především rozbohem systému Transrapid.

Práce popisuje historii a vývoj magneticky levitovaných systému, následně rozbor jednotlivých druhů magnetické levitace z fyzikálního hlediska. Podrobně se zabývá elektromagnetickou levitací EMS, na kterém pracuje systém Transrapid. Jsou zde také uvedeny základní parametry vlakových jednotek a porovnání s konvenční železniční dopravou. Podrobně jsou rozebrány zásadní elektrické části vozidel a magnetických tratí. Pozornost byla věnována lineárnímu motoru (stator) a elektromagnetu (rotor), což tvoří pohon systému Transrapid. Práce také obsahuje budoucnost dopravy na bázi magnetické levitace, kde jsou uvedeny tratě, na kterých se již Maglev jednotky provozují a také tratě, které jsou ve výstavbě, a blízký provoz se uvažuje. Na konci práce je nastíněn rozvoj a budoucnost supravodivých materiálů.

## **2 Historický vývoj kolejové dopravy**

Vývoj magnetické levitace začal na počátku 20. století. Vývoji předcházelo rozšíření a vývoj zařízení, které jsou součástí vozidel Maglev. V Japonsku probíhal vývoj superexpresů maglev ve dvou koncepcích. Japanees Airlines (JAL) projektovaly typ Transrapid a Japanees Railways (JR) typ založený na supravodivých magnetech. Od typu Transrapid bylo v Japonsku upuštěno. Transrapid se začal vyvíjet v Německu v druhé polovině 20. století. Chronologické shrnutí vývoje Maglev je následující.

- 1902 - Alber A. Albertson získal patent na využití magnetismu v železniční dopravě. Jednalo se o vozidlo, která byla vybavena stejnosměrnými elektromagnety. Přitažení elektromagnetu ke kolejnici vlak nadlehčovaly (nedocházelo k levitaci). Elektromagnety byly napájeny z baterie. Vlak byl tažen elektrickou lokomotivou, pohybující se koly po kolejnici. Albertson sestavil funkční model.
- 1912 – Francouzský vědec Emile Bachelet získal patent na levitující vlak, který pracoval na principu blízkému EDS. Cívky, jež byly zabudovány v jízdní dráze a buzeny střídavými proudy, indukovaly v podvozku vozidla vířivé proudy, jejich magnetické pole bylo v interakci s polem cívek a nadnášelo vozidlo.
- 1922-1934 – Německý inženýr Hermann Kemper začal pracovat na principu EMS a zároveň je považován za objevitele principu EMS. Tento princip si roku 1934 nechal patentovat.
- 1935 – Předvedení prvního funkčního modelu železnice maglev o nosnosti 210 kg.
- 1963 – J. R. Powell navrhl levitaci se dvěma odpuzujícími se supravodivými cívkami.
- 1969 – J. R. Powell A G. D. Danby projektovali na principu EDS superexpres.
- 1969 – Spolkové ministerstvo dopravy Německa zahajuje systematický vývoj technologií vozidel maglev. Firma MBB (Messerschmidt-Bolkow-Blohm) vyrobila na principu EMS několik prototypů vysokorychlostních vozů, označovaných jako Transrapid.
- 1970 – Zahájení využití supravodivých magnetů v systému EDS pro vlakové jednotky.
- 1971-1975 Japonské aerolinie se účastní výroby vozidel maglev. Zhotovují zkušební vozidlo na základě principu technologie Transrapid.
- 1972 – Společnost JR zahájila vývoj superexpresů se supravodivými magnety chlazenými kapalným heliem. Výsledkem byl první prototyp ML100 pro čtyři osoby.
- 1975-1980 – JR vyprodukovaly prototyp ML500, který dosáhl maximální rychlosti 518 km/h. Drážní těleso mělo tvar písmene „U“ a ve svislých stěnách zabudovány stabilizační a pohonné cívky. Levitační cívky byly na dně drážního tělesa.

- 1977 - Vybudování zkušební tratě u města Mijazaki (ostrov Kjúšú, Japonsko) v délce 7 km.
- 1980-1984 - Vybudování zkušební tratě v severozápadním Německu u obce Lathen. Délka tratě je 31,5 km a je napájena větrnými elektrárnami. Jednalo se o první zkušební provoz superexpresu Transrapid, jehož se může účastnit veřejnost.
- 1986 – Japonské aerolinie představily nízkorychlostní vozidlo HSST-03
- 1990-2007 - V prefektuře Yamanaši (Japonsko) byla vybudována zkušební trať YMLT (Yamanashi Maglev Test Line) o délce 42,8 km. Součástí tratě byl i výstavní pavilon. Provozovaly se bezplatné zkušební jízdy pro veřejnost.
- 1997 – Nová souprava MLX-01 dosáhla rychlosti 552 km/h
- 1998 – Vznik společenství firem Siemens AG a ThyssenKrupp, nazvané Transrapid International – TRI. Společně vyvíjí a vyrábí superexpresy Transrapid.
- 1999 – Zhotovení Transrapid 08. Vozidlo splňuje veškeré požadavky na osobní přepravu, přičemž dosahuje rychlosti až 500 km/h (maximální rychlost 513 km/h).
- 2000 – Zahájení projektování superexpresu Čúó Šinkansen pro linku Tokio-Kofu-Nagoja-Nara-Ósaka. Délka tratě by měla být 350 km a přepravní doba přibližně jedna hodina. Tento projekt stále probíhá.
- 2003 – Vlaková jednotka MLX-01 dosáhla při zkušební jízdě rychlosti 581 km/h, přičemž projela úsek delší než 300 000 km a přepravila přes 50 000 cestujících.
- 2003 – Začal vývoj nových konstrukčních technologií s dopadem na snížení investic.
- 2005 – Přejít na vysokoteplotní supravodivé magnety.
- 2006 – Zahájení pravidelného provozu v Šanghaji (ČLR). Transrapid je součástí veřejné dopravy na vzdálenosti 31 km a je provozován do dnes.

Kdo vlastně stojí za vynálezem maglev? Tahle otázka nemá jednoznačnou odpověď, protože vývoj probíhal tendenčně a mnoho inženýrů vědců, ale i laiků přispělo k vynálezu a rozvoji systému maglev. Ovšem pokud se zaměříme na to, kdo původně vyvinul koncept magnetické levitace pro dopravní účely, tak se nejčastěji v literatuře setkáme se jmény Hermann Kemper pro systém EMS a Emile Bachelet pro systém EDS.[1], [2]

### **3 Princip dopravních systémů na bázi magnetické levitace**

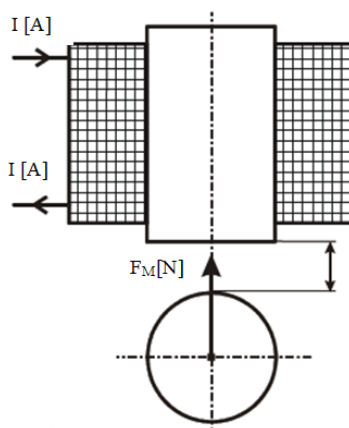
Levitace je jev, kdy se těleso vznáší ve vzduchu. Aby bylo možno dosáhnout levitace je potřeba překonat gravitační sílu. Levitace je tedy stav, kdy se dosáhne rovnovážné polohy a tedy součet sil na těleso působících je nulový. Ve fyzice existuje více druhů levitace jako např. aerodynamická, akustická, optická, magnetická. Posledně zmíněná levitace je nejznámější a také ji bude věnována tato část textu. Princip magnetické levitace, zkráceně maglev, spočívá v tom, že je potřeba dosáhnout rovnosti sil pomocí magnetického pole. Pokud vodičem protéká proud, vytvoří se okolo vodiče magnetické pole. Permanentní magnet vyvolává magnetické pole přirozeně. Vhodnou interakcí těchto polí můžeme dosáhnout rovnovážného stavu. V reálném světě se setkáváme s více působícími poli. To znamená, že v okolí vodiče se nenachází jen magnetické pole, ale zasahuje tam i pole elektrické, elektromagnetické, gravitační atd. Právě pole gravitační je pro levitaci nejzásadnější. Překonáním, respektive vyrovnáním sil působících na těleso v gravitačním poli, dosahujeme levitace. Síla, která uvádí těleso v případě magnetické levitace do rovnováhy, je síla elektromagnetická. Tato síla je vyvolána elektromagnetem. Způsob známý jako elektromagnetická indukce objevil Michael Faraday roku 1831. Postupně byl upravován až do konečného znění, které stanovil Maxwell. Maxwellovy rovnice popisují vztah mezi magnetickým a elektrickým polem.

Magnetická levitace v dopravě by se dala popsat heslem „jízda bez kola a létání bez křídel“. Doprava na bázi maglevu vyplňuje prostor mezi leteckou a železniční dopravou. Oproti běžné vysokorychlostní železniční dopravě dosahuje vyšších rychlostí a zvládne vyšší traťové stoupání. V porovnání s leteckou dopravou je zde výhoda v rychlosti odbavení cestujících a také na kratším úseku rychlost. V porovnání s oběma druhy dopravy je maglev ekonomičtější v provozu a tím také ekologičtější.

#### **3.1 EMS (Electro-Magnetic Suspension)**

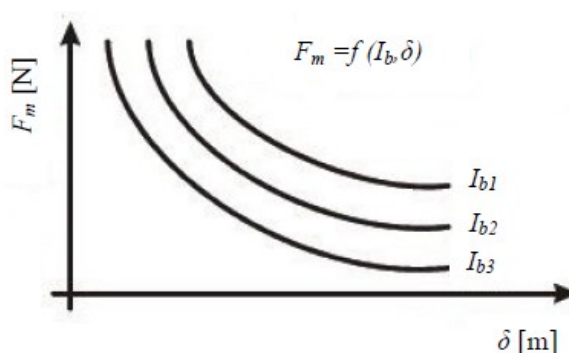
Představuje nejrozšířenější princip magnetické levitace. Princip je založený na přitahování feromagnetického tělesa elektromagnetem. Tento princip využívá německý systém Transrapid na svých vlakových jednotkách.

Systém je tvořen stejnosměrným elektromagnetem, kterým se přitahuje k feromagnetickému tělesu. Bez regulace je tento obvod velmi nestabilní. Jestliže síla  $F_g > F_m$ , tak nedojde k přitažení elektromagnetu, tedy proud tekoucí budícím vinutím je nedostatečný k dosažení potřebné síly pro přitažení k feromagnetickému tělesu. V případě, že k přitažení již došlo, tak se vlivem zmenšení budícího proudu začne zvětšovat vzduchová mezera mezi elektromagnetem a feromagnetickým tělesem. Při  $F_g < F_m$  nastane přitažení a pokud není obvod regulován, dojde k fyzickému kontaktu dvou navzájem ovlivňujících se komponentů (viz obr3.1).



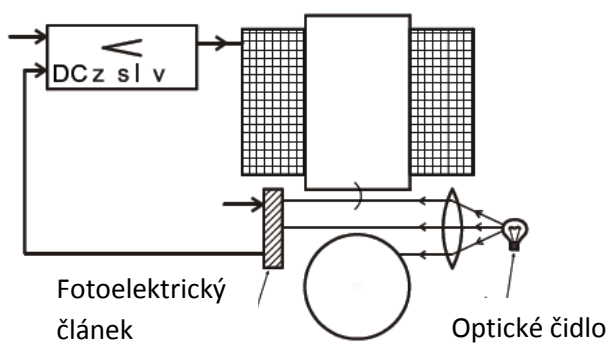
**Obr 3.1** Princip Elektromagnetické levitace [3]

Rychlost je úměrná rozdílu velikostí sil, a tedy při větším rozdílu sil dochází rychleji ke zvětšení vzduchové mezery. Závislost je nelineární a s poklesem síly roste vzduchová mezera nerovnoměrně. Čím je síla vyvolaná elektromagnetem ( $F_m$ ) větší, tím je menší vzduchová mezera. Zpočátku je pokles prudší. Způsobuje to silné magnetické pole v blízkosti elektromagnetu a feromagnetického tělesa. Se zvětšující se vzduchovou mezerou klesá síla elektromagnetu a slábne magnetická vazba mezi tělesy. Vzduchová mezera klade odpor. Síla je v tom to případě analogií proudu.



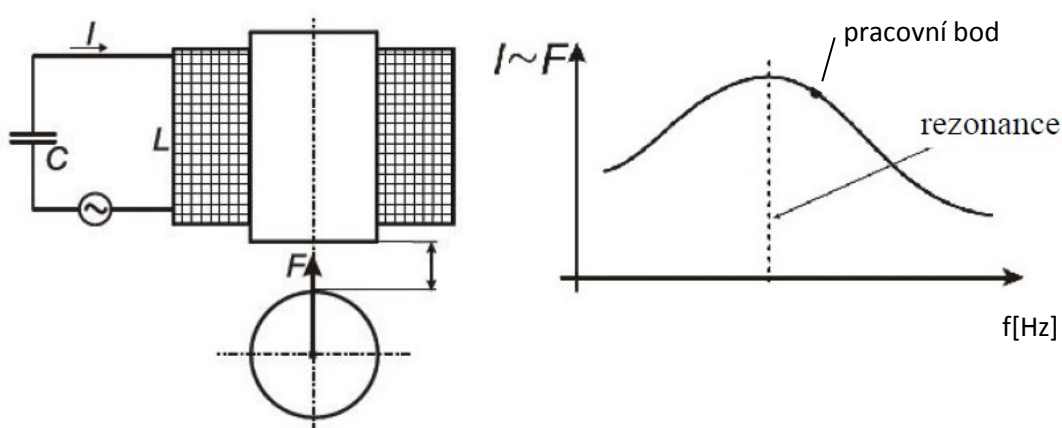
**Obr 3.2** Závislost síly na vzduchové mezeře při různých budících proudech [3]

Při dosažení  $F_g = F_m$  se dostane vlak do levitace. Stav rovnosti těchto sil je velmi nestabilní a vyžaduje zpětnovazební regulaci budícího proudu elektromagnetu. Regulační obvod nám řízením proudu do vinutí udržuje vlak v levitaci. Pro snímání vzduchové mezery je využito optické čidlo polohy. Princip čidla je založen na osvětlování fotoelektrického článku a výstupem z čidla je napěťový signál, který vstupuje do regulačního obvodu. Řízení vyžaduje tedy výpočetní jednotku, která zpracovává informace a řídí proud tekoucí do budícího vinutí elektromagnetu viz obr 3.3.



**Obr 3.3** Řízení pomocí fotoelektrického člunku [3]

Dalším možným regulačním principem je pomocí střídavého elektromagnetu, kdy dochází k samočinné regulaci pomocí RLC obvodu. Obvod je zapojen tak, že v sérii s budicí cívkou je zapojen kondenzátor. Cívka zde představuje RL prvky. Kapacita kondenzátoru je volena tak, aby se obvod nacházel v blízkosti rezonance respektive mírně za ní. Důvodem je, že při sériové rezonanci se výrazně zvedne proud a tím udrží vlak v levitaci. Proměnný prvek v tomto zapojení bude indukčnost, která bude měnit velikost se změnou velikosti vzduchové mezery. Proud, který bude tímto způsobem řízen, bude působit silově proti změně, tak aby síly vyrovnal. Princip řízení pomocí střídavého elektromagnetu není příliš vhodný z důvodu velké časové konstanty, která je dána poměrem  $R/L$ . Prvek  $R$  je téměř neměnný a tedy velikost časové konstanty je dána změnou  $L$ . Pokud  $F_g > F_{el}$  zvětšuje se tedy vzduchová mezera mezi kolejnicí a elektromagnetem a indukčnost klesá, je potřeba tedy rychlá reakce regulačního obvodu. Pokud ale indukčnost klesá, časová konstanta se zvětšuje a regulační obvod nestíhá uregulovat budicí proud do vinutí elektromagnetu. Další nevýhodou je slabé tlumení silového působení, což způsobí vznik oscilací při nestabilní poloze. Vzniklé oscilace mohou divergovat a obvod se lehce stane nestabilním. Nevýhodou je také indukční charakter obvodu při nestabilitě s malým účínkem. Levitace se tedy neřídí pomocí střídavého elektromagnetu z výše uvedených důvodů, používá se výhradně kybernetické řízení za pomoci výpočetní jednotky.[3]



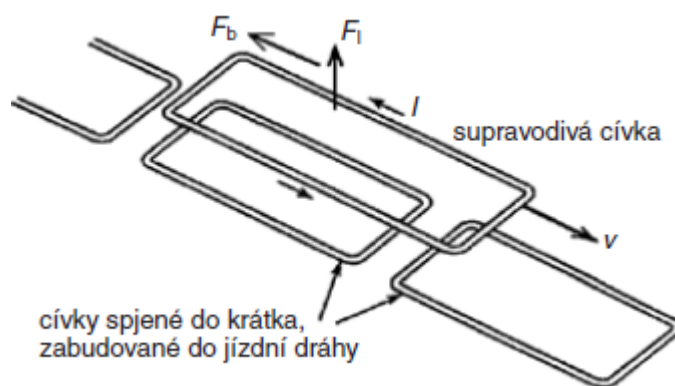
**Obr 3.4** Regulační obvod pomocí střídavého elektromagnetu a graf závislost proudu na frekvenci [3]



### 3.2 EDS (Electro-Dynamic Suspension)

Elektrodynamická levitace je založena na principu odpuzování stejnosměrného elektromagnetu od soustav pevných cívek. Jedná se o typ repulzivní levitace, tedy levitace odpuzováním. Tento systém se uplatnil především v Japonsku JR (Japanese Railways) na vlacích MLU.

Funkční princip EDS je založen na odpuzování, kdy v jízdní dráze jsou zabudované pevné obdélníkové cívky spojené do krátka, nad kterými se pohybuje plochá obdélníková cívka (elektromagnet). Obdélníková cívka je buzena stejnosměrným proudem. Pohybující se cívka vytváří magnetické pole a při jejím pohybu se mění magnetický tok spřažený s pevnými cívkami zabudovanými v jízdní dráze a indukuje v nich proudy. Pohybující se cívka je vystavena působením síly, která má dvě složky. Jedna složka způsobuje odpuzování  $F_l$  od pevných cívek (levitaci) a druhá složka způsobuje brždění  $F_b$ , protože působí proti směru pohybu. Brzdící sílu musíme překonat pohonem.

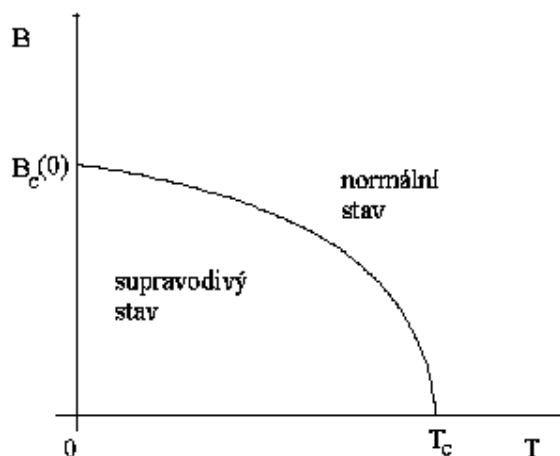


**Obr 3.5** Princip elektrodynamické levitace [3]

Vzhledem k velké hmotnosti vlaku a maximální kapacitě cestujících, je zapotřebí vyvinout velkou odpudivou sílu. Velikost síly závisí na velikosti proudu tekoucího budícím vinutím pohybuující se cívky. Průtok proudu vinutím vyvolá magnetické pole. Aby pohybuující se cívka byla schopna vytvořit silné magnetické pole, je zapotřebí ji dodat velký proud. Vysoké hodnoty proudu způsobují velké ztráty a vinutí se více zahřívá. Použitím supravodivé cívky dosáhneme schopnosti vést vysoké hodnoty proudu budícím vinutím elektromagnetu, aniž by došlo ke zničení nebo nadměrnému opotřebení vlivem vysoké teploty. Supravodivosti dosáhneme podchlazením materiálu vinutí na určitou teplotu. Chladícím médiem je Helium, kterým dosáhneme podchlazení na teplotu  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota je dále udržována na nízké hodnotě v kryostatu (přístroj k udržení nízké konstantní teploty, ve kterém je cívka vložena, název je řeckého původu kryos = mráz). Supravodivý stav znamená, že materiál sloužící k vedení proudu vykazuje téměř nulový odpor. Magnetické pole může způsobit vznik odporu v supravodivém stavu. Hodnota, při které se změní supravodivý stav na stav normální, je dána vztahem (3.1)

$$B_c(T) = B_c(0) \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

kde  $B_c$  je kritická indukce magnetického pole při teplotě 0K. [1], [4], [5], [27]

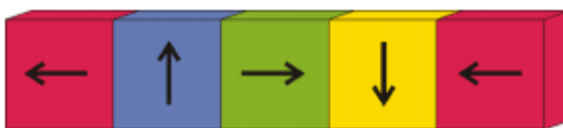


**Obr 3.6** Závislost kritické indukce na teplotě [4]

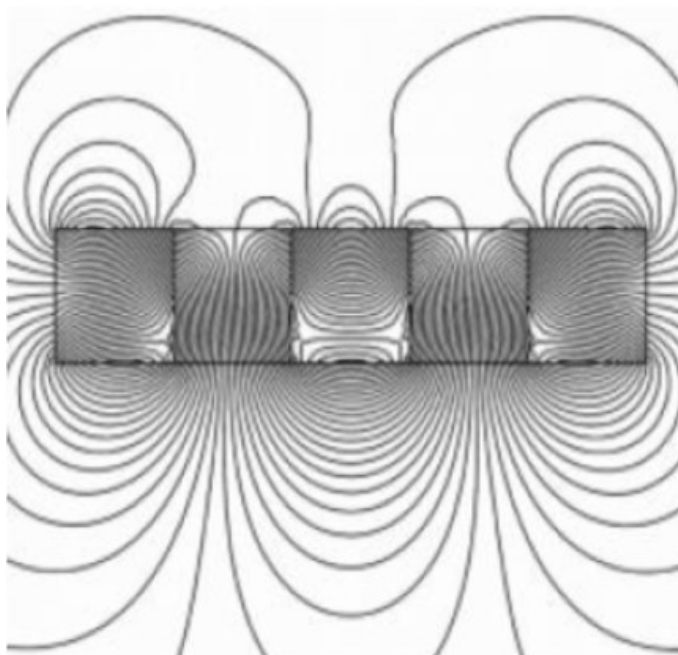
### 3.3 Inductrack

Systém pracující na bázi permanentních magnetů, uspořádaných podle Halbachovy soustavy, nese označení Inductrack. Vývoj začal v USA, kde tento projekt podporuje NASA pro využití Inductracku jako katapultu pro start kosmických raket.

Při konstrukci urychlovače částic došel Klaus Halbach k uspořádání permanentních magnetů tak, aby dosáhl mimořádně silného magnetického pole. Toto uspořádání nese název Halbachova soustava magnetů viz obr. 3.7



**Obr 3.7** Halbachova soustava permanentních magnetů [15]



**Obr 3.8** Magnetické pole Halbachovy soustavy permanentních magnetů [15]

Magnetické pole nad soustavou permanentních magnetů je poměrně slabé, ale ve spodní části soustavy je naopak velmi silné

Šipky znázorněné na obr 3.8 ukazují směr magnetizace. Pomocí takto spojených magnetů dosáhneme silného magnetického pole. V interakci s magnetickým polem cívek uložených v jízdní dráze, získáme levitační systém. Systém jízdní dráhy je podobný systému EDS. Vozidlo je vybaveno pomocnými koly pro rozjezd a dojezd vozidla. Vlaková jednotka musí být vybavena i pohonem a vlak se musí pohybovat minimální rychlostí, aby došlo k indukování proudů do cívek, které vytvoří magnetické pole opačného smyslu. Jako pohon bývá použit lineární synchronní motor s dlouhým statorem. Magnetické pole magnetů a cívek se vzájemně odpuzují a vytváří mezi sebou vzduchovou mezeru. [6], [7]

### 3.4 Porovnání systému EDS a EMS

Systém EDS využívá supravodivých cívek k dosažení silného magnetického pole, kdy cívkami protéká proud o hodnotě 700kA. Tento proud vybudí magnetické pole o hodnotě 4 až 6 T. Cívky je potřeba chladit v kryostatu. V porovnání levitační systém EMS nepotřebuje tak velký proud k vyvolání magnetického pole způsobujícího levitaci. Zatímco rozběh vozidla v případě EDS není bezkontaktní, protože k dosažení levitace potřebuje určitou rychlost (vozidlo je vybaveno koly), tak systém EMS může levitovat i v klidové, popřípadě malé rychlosti. EMS je výhodné také tím, že nepracuje se supravodiči. Není třeba vybavovat složité chlazení a kryotechnické vybavení a provoz je energeticky úspornější. Ovšem tato výhoda může být v budoucnu překonána tím, že vysokoteplotní supravodiče jsou stále ve vývoji a tedy chlazení tekutým dusíkem by se mohlo stát rozšířenější, což by vedlo k zjednodušení principu EDS. Vzhledem k velikosti vzduchové mezery je systém EDS méně náchylnější na vibrace a nemusí být kladen důraz na konstrukci jízdní dráhy. Shrnutí systému EDS a EMS je následující.

### EDS

#### *Výhody:*

- Větší vzduchová mezera přináší větší bezpečnost (např. v případě zemětřesení), menší nároku na jízdní dráhu a na konstrukci vozidla
- Levitace je stabilní, nevyžaduje složitou regulaci stability
- Vozidla mají menší hmotnost

#### *Nevýhody:*

- Vozidlo nemůže levitovat v klidové poloze a pro rozjezd a dojezd potřebuje pomocná kola
- Systém pracuje se supravodiči a je zapotřebí složitého kryotechnického zařízení
- Vytváří silné magnetické pole a je zapotřebí kabiny pro cestující magneticky stínit
- Tlumení ve vertikálním směru je nízké (potřeba tlumení vibrací vlaku)

### EMS

#### *Výhody:*

- Vozidlo může levitovat v klidovém stavu
- Systém nepracuje se supravodiči
- Slabé magnetické pole (přibližně  $100\mu\text{T}$ )

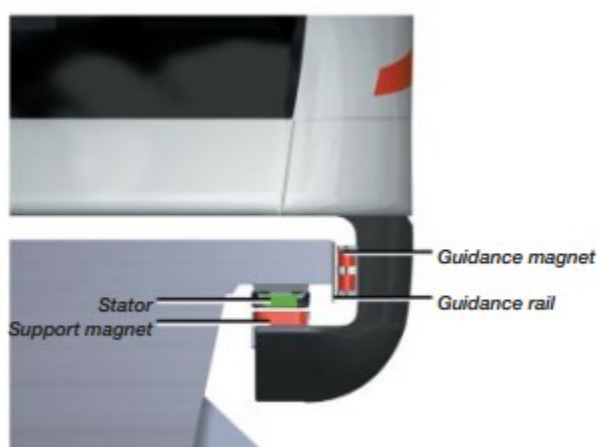
#### *Nevýhody:*

- Složitá regulace budícího proudu za účelem stabilní vzduchové mezery
- Větší hmotnost vozidla
- Malá vzduchová mezera klade nároky na konstrukci vozidla i na konstrukci jízdní dráhy[8]

## 4 Transrapid

Systém magnetické levitace vyvinutý v Německu. Systém Transrapid pracuje na bázi elektromagnetického systému (EMS), který se uplatňuje ve vysokorychlostní železniční dopravě. Historie sahá až do roku 1934 kdy Hermann Kemper, patentoval princip levitování založených na EMS. Ministerstvo SRN (Spolkové republiky Německo) podnítilo vývoj magneticky levitovaných systémů v dopravě roku 1969.

Výhodou EMS je absence motoru ve vozidle. Stator je rozvinut pod jízdni dráhou, tedy není součástí vlaku. Rotor je tvořen elektromagnety, které jsou uchyceny na podvozku. Uspořádání podvozku je znázorněno na obr 4.1.



**Obr 4.1** Uspořádání levitační, stabilizační a pohonné části systému Transrapid [9]

Vodící dráha je objímána částí podvozku, na kterém jsou uchyceny levitační a stabilizační elektromagnety. Elektromagnety jsou buzeny požadovaným proudem pro udržení vlaku v levitaci. Vzduchová mezera mezi elektromagnetem a statorovým vinutím, které je uloženo ze spodní strany jízdni dráhy, je udržována na konstantní hodnotě 10mm. Díky dokonalejšímu řízení a dokonalejším drážním tělesům je v dnešní době možno snížit velikost vzduchové mezery na 8-9mm. Tímto snížíme i potřebný budící proud elektromagnetu a tedy snížíme spotřebu elektřiny. K jízdni dráze jsou upevněny dynamoplechy, ve kterých se nachází statorové vinutí. Vinutí je uloženo v drážkách. Dynamoplechy v jízdni dráze jsou statorem pohonu vozidla. Použití dynamoplechů je z důvodů lepších magnetických vlastností (menší vířivé proudy). V drážkách plechů je uloženo 3-fázové vinutí. Vinutí statoru indukuje postupné běžící magnetické pole a pomocí elektromagnetů (rotoru) unáší vozidlo ve směru jízdy.

Zatím se jedná o nejrychlejší dopravní pozemní systém, který byl dosud vymyšlen. V oblasti bezpečnost je na špičce moderní dopravy. Letecká doprava i doprava automobilová je podstatně rizikovější, než železnice. Bezpečnost maglevů tkví především ve způsobu napájení a také řízení. Vodící dráhy jsou uzpůsobeny mimoúrovňově. Nachází se buď nad zemským povrchem ve výši 2-2,5m a nebo jsou v tunelech. V každém případě nehrozí přímá kolize

s automobilovou ani leteckou dopravou. Systém nachází uplatnění i z hlediska ekonomiky provozu. Opotřebení během provozu je velmi malé díky tomu, že se vlak vznáší na vzduchovém polštáři nad vodící dráhou. Nedochází tedy k fyzickému kontaktu, jako je tomu u běžné konvenční železnice založené na principu kolo-kolejnice. Tím, že se jedná o bezkontaktní provoz, se snižují i ztráty tření v ložiscích. Ztráty, kterým musí čelit každá doprava jsou ztráty aerodynamické. Abychom nemuseli uvažovat ani o těchto ztrátách, museli bychom provozovat dráhu ve vakuovém tunelu. I tato představa je jedním z návrhů dopravy na bázi magnetické levitace. [9], [3], [10]

## 4.1 Technické parametry Transrapidu

Souprava Transrapidu se skládá z dvou koncových vozů a mezi nimi několika vloženými jednotkami. Koncové vozy jsou vybaveny kabinou pro strojvedoucího, odkud probíhá nejen záložní řízení, ale především kontrola jízdy vlaku. I když jsou vlaky řízeny dálkově, je zde přítomen i strojvedoucí, aby dohlížel na chod systému a v případě nebezpečí zasáhl. Délka vlaku je omezena na délku nástupiště. Vzhledem k běžně stavěným soupravám na přepravní kapacitu cestujících, se vlaky provozují maximálně jako 10 vozový, přičemž nejméně lze na trať vyslat dvou vozovou soupravu. 10 vozová souprava je již téměř 270 metrů dlouhá a při rychlostech kolem  $400\text{--}500\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  je pro spínání a vypínání napájených úseků nutno zvolit delší rozmezí. Vzhledem k rychlostem, kterými se soupravy po trati pohybují, musí být karoserie vlaku velmi odolná a přitom lehká. Základním materiálem na střechu, bočnice a čelnice je použit hliník. Vlaky jsou konstruovány nejen na osobní dopravu, ale také na nákladní. Údaje pro Transrapid 08 jsou uvedeny v následujících tabulkách:

**Tab 4.1** Parametry Transrapidu 08

<b>Rozjezd na rychlost</b>	<b>Za čas (s)</b>
0 až $100\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	31
0 až $300\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	104
0 až $500\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	278
<b>Dojezd z rychlosti</b>	<b>Za čas (s)</b>
$100$ až $0\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	58
$300$ až $0\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	115
$500$ až $0\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	176
<b>Příkon (MW)</b>	<b>Při dvou sekcích</b>
při $200\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	0,9
při $300\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	2,2
při $500\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	8,2
<b>Rozměry sekce (m)</b>	<b>Koncová sekce</b>
délka	27,00
šířka	3,70
výška	4,16
<b>Kapacita</b>	<b>Při dvou sekcích</b>
počet sedadel	124 až 184
hmotnost cestujících (t)	28
hmotnost nákladu (t)	60

Spotřeba ( $W \cdot h / \text{osoba} \cdot \text{km}$ )	
při $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	30
při $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	44
při $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	63
Spotřeba při $430 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 446 cestujících a 5 sekci	55

Tab 4.2 Rychlost Transrapidu 08

Rychlost [km/hod]	
maximální	513
provozní	400 až 500

## 4.2 Řízení transrapidu (OTN, dálkové)

Řízení již neprobíhá tak, jak je dnes známo u běžných vlakových souprav. Pohonné jednotky Transrapid jsou řízeny dálkově na bázi optických vláken a radiového spojení s frekvencí 38GHz. Digitální radiový přenos dat OTN (Open Transport Network), je systém navržený pro řízení. Tento systém je základním systémem, který se využívá v průmyslu, železniční dopravě, při přenosu elektrické energie a tam kde je potřeba bezchybné komunikace pro velké spektrum protokolů na dlouhé vzdálenosti. Je tedy jedno řídicí místo (Velín) odkud probíhá řízení napájení satorového vinutí, kontrola regulačních obvodů pro řízení stabilní vzduchové mezery. Dispečerské centrum má jednoznačnou informaci o poloze, rychlosti a zatížení vlaku. V případě nebezpečí je v kabině přítomen strojvedoucí, který má plnou pravomoc zasáhnout. Toto je velice důležité, protože ani dnes si nikdo nedovolí svěřit lidské životy čistě do moci techniky. V podstatě se jedná o propojení dvou počítačů pomocí bezdrátové komunikace a optického vlákna. Ke sledování vozidla jsou umístěny na začátku a na konci vlaku kódové značky. Snímány jsou pomocí dvou radiových stožárů, které jsou umístěny v odstupu několika kilometrů podél tratě. K přijímači jsou data vedena bezdrátově a dále probíhá přenos přes optická vlákna do dispečerského centra. Výhody tohoto systému řízení jsou především, ve 100% spolehlivosti. Záruka je dána více paralelními vlákny schopnými přenést signál i v případě výpadku jednoho vlákna. Zaručená šířka pásma s dostatečným frekvenčním oddělením, tak aby byla nenarušitelná okolním rušením. Využití principu plug and play, který je schopen na zařízení vybavené potřebným hardwarem sám nastavit komunikační funkčnost. Výhodou je i využití na dlouhé vzdálenosti až 2000 km ve všech terénech.[11]

## 4.3 Princip

Pro řízení rychlosti vlaku a brzdění je třeba řídit proud procházející satorovým vinutím. Střídavý proud procházející vinutím způsobuje silové účinky, které pohybují vozidlem v požadovaném směru. Rychlost pohybu můžeme korigovat frekvencí satorového proudu. Frekvenční měniče jsou umístěny v napájecích stanicích a proud je veden do satorového vinutí kabely. Do napájecích stanic je přiváděna elektrická energie 110kV vedením. Silové měniče se

skládají z GTO tyristorů, které jsou chlazeny vodou. Měničová jednotka má výkon 15 MVA a skládá se ze vstupního transformátoru pro snížení napětí pro usměrňovač. Dalším blokem je usměrňovač skládající se ze dvou v sérii zapojených třífázových můstků, přičemž jeden je řízený a druhý neřízený. Výstupem z usměrňovače je dvanácti pulzní usměrněné napětí, vstupující do stejnosměrného mezi obvodu tvořeného cívkami a kondenzátory. Výstup stejnosměrného meziobvodu je zapojen na střídače, kde je možná regulace v rozsahu 0 až 7664V napětí, 0 až 270 Hz frekvence a 0 až 1200A proudu. Střídače jsou zapojeny na výstupní transformátor. Brzdění pak zajišťuje přechod z motorického do generátorického režimu. Do statorového vinutí se naindukuje proud, který je následně dodáván zpět do sítě. Vinutí statoru je uloženo v drážkách a rozloženo v délce sekce jen o něco větší, než je délka 10-voze soupravy. Důvodem je snížení ztrát na minimum. Jednotlivé sekce se během jízdy přepínají a napájí se vždy jen ta sekce, po které se pohybuje vlaková jednotka. Brzdění lze dosáhnout také jiným neelektrickým způsobem. Lze využít aerodynamickou brzdu. Souprava začne brzdít vlivem nárazu vzduchu o karoserii a přidavné výsuvné prvky karoserie, které kladou proudícímu vzduchu odpor.

#### **4.4 Jízdní dráha**

Jízdní dráha musí být nutně mimoúrovňová, vzhledem k uspořádání podvozku. Podvozek je z části nad vodící dráhou a z části pod. Betonová konstrukce je stavěna do výšky minimálně 1,5m nad zemí, je ve tvaru písmena „T“. Skládá se z nosníků o délce 50m. Mimoúrovňový pohyb zajišťují vodící dráhy na opěrách přibližně ve výšce 1,5m, nebo mosty a tunely. Výhybky jsou samostatné celky o dvou až trojnásobné délce jednoho nosníku. Výhybky jsou vyrobeny z oceli. Ocel je dostatečně měkká a můžeme ji ohnout do požadované polohy. Betonové konstrukce, ale pro potřebu ohybu jsou z oceli. Pohyb mezi fixními polohami je zajištěn elektromechanicky pomocí elektromotory. Rychlost, kterou se může Transrapid pohybovat po výhybkách je do  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  pro nízkorychlostní výhybku nebo do  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  pro vysokorychlostní výhybku. V bocích, ze spod betonové konstrukce, je umístěno statorové vinutí. Napájení je kabelovým vedením z napájecí stanice do napájecího místa, které je uprostřed napájeného úseku. Tak jako pohyb vlaku je vůči betonové konstrukci bezkontaktní, tak i přenos elektrické energie pro pohon je bez kontaktní. Jedná se o ucelený, naprosto bezkontaktní systém, kde nevzniká tření mezi kolem a kolejnicí, ani sběračem a trakčním vedením tak, jako u konvenční železniční dopravy. Přenos elektrické energie probíhá přes statorové vinutí pomocí elektromagnetické indukce, tedy bezdotykově přes lineární generátory. V případě výpadku proudu dodávaného do statorového vinutí je vlak vybaven baterií. Pohyb vozidla je tedy i při výpadku elektřiny bezpečně řízen do následující zastávky nebo nouzového zastavovacího místa. Pohyb je postupně zpomalován, až do určité minimální rychlosti, kdy vlak dosedá na lyžiny a zastaví.

Magnetická dráha je provozu schopná i v extrémně nízkých teplotách a sněhu. Vzhledem k poloze umístěného vinutí se nestane, že by zapadlo sněhem. Přenos elektrické energie je veden kabelovým vedením, a tak se tedy nemusíme starat o namrzající trakční vedení. Sníh na povrchu dráhy je jízdou vlaku shrnut pryč. V případě vyšší vrstvy je možno sníh odhrnout speciálním vozidlem.



Vlaky zvládají zpravidla vždy větší převýšení než konvenční železniční doprava a to až do 10%. V porovnání s běžnou dopravou, kde je maximální možné stoupání jen okolo 4%, dráha Transrapidu lépe kopíruje terénní nerovnosti. Schopnost stoupat do vyšších nadmořských výšek je dána také adhezní přilnavostí kola s kolejnicí. V tomto případě má doprava na bázi magnetické levitaci větší možnosti. Můžeme vybudovat jízdní dráhu bez toho, abychom masivně narušili charakter přírody. Dále poloměr zatáčení je dán rychlosti na daném úseku. Při nižších rychlostech působí menší odstředivá síla a tedy je možno zkonstruovat prudší charakter zatáčení. Respektive jízda vlaku se přizpůsobí jízdní dráze, která kopíruje terénní nerovnosti. Parametry jízdní dráhy pro Transrapid 08 jsou uvedeny v tabulce 4.3. [12], [10]

**Tab 4.3** Jízdní dráha Transrapidu 08

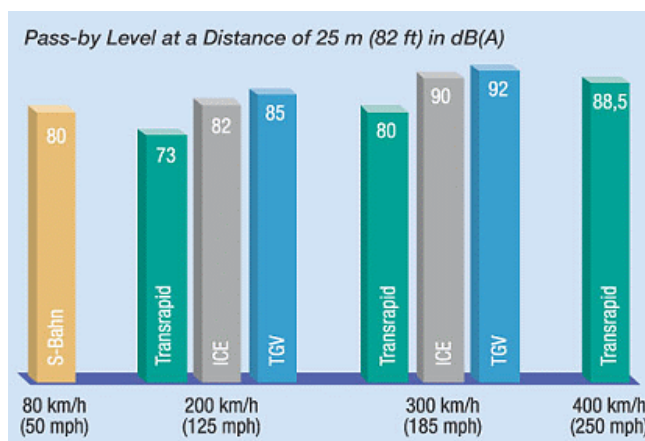
Jízdní dráha	
stoupání	$\leq 10\%$
boční náklon	$12^\circ$
Poloměr Zatáčení (m)	
při $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	705
při $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	1,590
při $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	4,415

Pohonné systémy transrapid se často provozují na koridorové trati. Zde je třeba počítat s odstupem dvou protisměrných tratí, protože při vysokých rychlostech nastává velký tlakový ráz, když se soupravy míjí. Vzdálenost mezi jízdními dráhy musí být 4,4 metrů pro rychlosti do  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a pro rychlosti do  $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  musí být rozestup mezi dráhami 5,1 metrů. Vzdálenosti drah od sebe jsou uvažovány od středu. Šířka jedné dráhy je 2,8 metrů, tedy celkové rozpětí koridoru je mezi 10,1 až 11,4 metrů. Vzhledem k tomu, že se jedná o systém, který bez problémů kopíruje nerovnosti, tak není nutné tolik budovat tunely. Pokud jsou však tunelové průřezy nezbytné, pak jsou vždy menší než u běžné železnice. Důvodem je zde nižší světlá výška vozidla a aerodynamický tvar. Průřezy tunelů se pohybují  $70\text{--}225 \text{ m}^2$  pro koridorovou trať a  $36\text{--}120 \text{ m}^2$  pro jednosměrnou trať. Šířka tunelů závisí vždy na rychlosti, přičemž horní hranice průřezů počítá s rychlostí  $450 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . [10]

## 4.5 Přednosti transrapidu

### Hlučnost

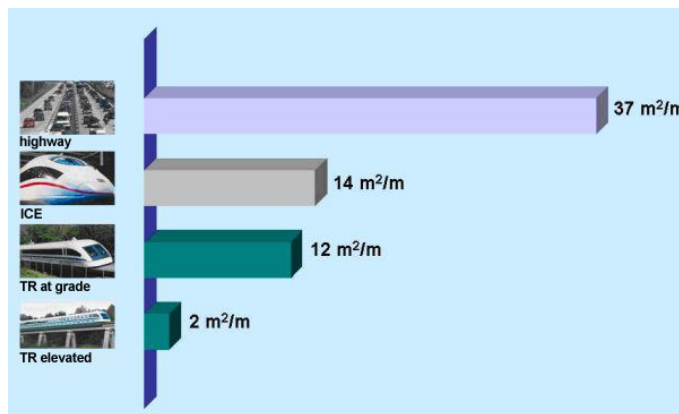
Hladina hluku během jízdy Transrapidu v porovnání s běžnou železniční, ale i jinou dopravou je výrazně nižší. V porovnání s vysokorychlostní železniční dopravou TGV a ICE je o 10-15dB tišší a v konečném důsledku nepřesáhne ani hladinu 100dB při rychlosti  $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Odpadá hluk způsobený kontaktem mechanických částí. Zůstává tedy pouze nutnost odolávat aerodynamickému tření vzduchu. Hluk vzniklý aerodynamickým třením se projevuje v rychlostech nad  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Změřené údaje vycházejí ze vzdálenosti 25m od osy dráhy. Hladina hluku se odvíjí i od charakteru jízdy. Brždění staví konvenční železniční dopravu ještě více do nevýhody, protože při brždění dochází ke tření a to má za následek vznik hluku.



Obr 4.2 Intenzita hluku ve vzdálenosti 25m od zdroje [9]

### Zásah do přírodní krajiny

Vlaky Transrapid v porovnání s dalšími druhy dopravy zasahují do přírody nejmenší mírou. Na obr. 4.3 je znázorněn graf, ze kterého lze vyčíst, že dle typu konstrukce magnetické jízdní dráhy se může zastavěná část značně měnit. U mostové konstrukce je zásah pouhé 2m<sup>2</sup> na vzdálenosti 1m, což je v porovnání s dálnicí zanedbatelná plocha. Mimo jiné vzhledem k možnostem prudkého stoupání a klesání vlaku je možno maximálně zkrátit a vhodněji umístit trasu v terénních nerovnostech.

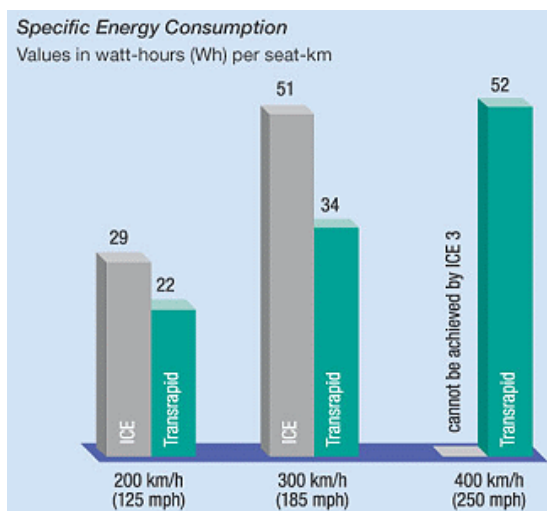


Obr 4.3 Zásah do krajiny (zastavěná plocha na jednotku délky) [9]

### Energie

Energie je zajímavý parametr, nejen z hlediska úspory ekonomické, ale také z ekologického hlediska. Přesto, že se elektrická železniční doprava přímo neúčastní znečištění, tak potřeba elektřiny zvyšuje potřebu vyrobit dostatečný elektrický příkon pro železniční dopravní síť. Modernizace a technický pokrok v dopravě je podnícen nejen zvyšováním bezpečnosti a rychlosti dopravy, ale také snížením spotřeby elektrické energie. Transrapid je výsledkem technického pokroku v železniční dopravě. Výhody v oblasti bezpečnosti a rychlosti jsou jednoznačné. Dosud nemáme bezpečnější a rychlejší pozemní dopravu než systém Transrapid. Spotřeba elektrické

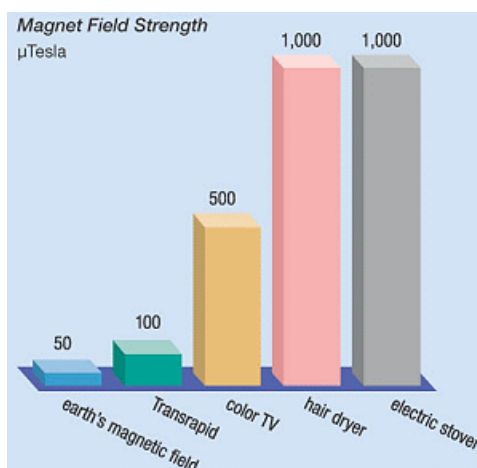
energie je přibližně o 30% nižší, než je u ICE. Důraz na energetickou výhodnost je především ve vyšších rychlostech, kdy Transrapid dosahuje až 40% úspory energie oproti ICE při rychlosti  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Lze předpokládat, že i při rychlostech nad  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  bude energetická úspora růst ve prospěch Transrapidu.



**Obr 4.4** Spotřeba elektrické energie [9]

### Magnetické pole

Míra intenzity magnetického pole je velmi nízká. Porovnání s ostatními běžně používanými spotřebiči by se dalo říci, že téměř zanedbatelná. Nemusíme tedy kabinu pro cestující ani stínit, což je výhoda oproti systému EDS, kde se bez tohoto opatření neobejdeme. Z obrázku lze vyčíst, že intenzita vyvinutá systémem Transrapid je přibližně 2x větší než intenzita země.



**Obr 4.5** Intenzita magnetického pole [9]

## **5 Zásadní elektrické části vozidel a tratí s magnetickou levitací**

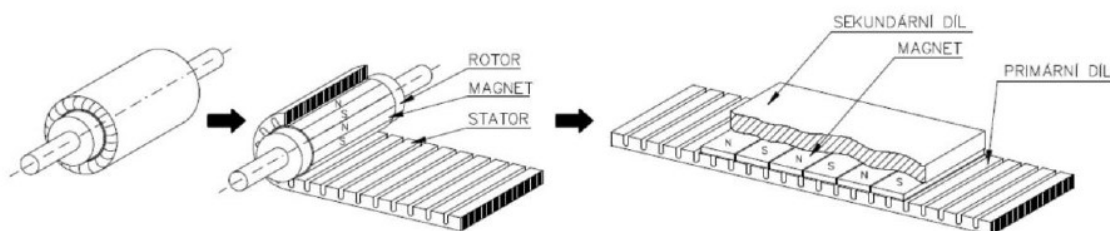
### **5.1 Lineární synchronní motor**

Lineární motor není nic převratného na poli vědy a techniky. Pracuje na indukčním principu. Můžeme si ho představit jako klasický rotační motor rozvinutý do roviny, který umožňuje přímočarý pohyb bez zprostředkujícího převodu. Lineární motor tedy umožňuje lineární (přímočarý) pohyb. Můžeme tak získat přinejmenším tolik druhů lineárních motorů, jako máme točivých strojů. Vzhledem ke své konstrukci se stal prvním lineárním motorem asynchronní motor. Důvodem bylo jednoznačně rozsáhlé spektrum výkonů a také jeho robustní sekundární část, která ve svém nejjednodušším tvaru nepotřebuje ani elektrický ani mechanický styk s hnací částí.

Hlavní problematikou lineárního pohonu je vyřešení přitažlivé síly mezi primárním a sekundárním dílem. Tato problematika byla řešena v kapitole 2, kde byly rozebrány různé principy magnetické levitace. V podstatě se jedná buď o systém EDS, který pracuje na principu repulze, nebo o systém EMS, který pracuje na principu přitažlivosti primárního a sekundárního dílu. Zatímco systém EDS se zdá být energeticky náročnější a k vyvolání levitace je potřeba použít supravodivých elektromagnetů, systém EMS díky menší vzduchové mezeře je možno provozovat bez supravodivých magnetů. Dalším problémem je uspořádání mechanického vedení. Jízdní dráhy pro každý systém jsou jiné v závislosti na systému magnetické levitace. Posledním hlavním aspektem při řešení problematiky lineárního pohonu je přívod elektrické energie do pohyblivé části. Při běhu motoru je problematika vyřešena. Energie se transformuje ze statorového vinutí do rotoru elektromagnetickou indukcí, ale při rozběhu je situace komplikovanější. Tak jako rozběh asynchronního točivého stroje nepotřebuje buzení rotoru, protože se rozbíhá se skluzem a do pracovní oblasti se dostává do několika sekund (v závislosti na velikosti stroje), tak i lineární asynchronní motor je schopen se rozběhnout bez buzení rotoru. Vzhledem k tomu, že výkon potřebný k pohonu vlaku je značný a výkonová elektronika pokročila na vysokou úroveň, v oblasti frekvenčních měničů stal se základem pohonu lineární synchronní motor.

Výhoda použití synchronního motoru je především ve vysokém účínku. Nezatěžuje se tedy tolik napájecí vedení. Účíník můžeme regulovat buzením rotoru. Další výhoda je ve vyšší účinnosti a taky v lineární závislosti momentu na napájecím napětí. Motor je odolnější vůči kolísání napětí.

Důvodem rozvoje lineárních motorů používaných nejen v dopravě je větší dynamika, širší rozsah regulace, vyšší rychlost posuvu, vyšší přesnost polohování. Všechny výhody lineárního motoru jsou především v tom, že motor nekoná točivý pohyb, ale přímočarý. Nemusíme tedy brát v úvahu odstředivou sílu, což by vedlo k destruktivním následkům motoru při překročení nad určitou mez. U lineárního motoru nejsme omezeni ani rychlostí.



**Obr 5.1** Konstrukční celky lineárního indukčního motoru [17]

### 5.1.1 Konstrukce

Motor je tvořen jako běžný točivý elektrický stroj statorovým a rotorovým dílem. Rotor lineárního synchronního motoru je tvořen permanentními magnety popřípadě elektromagnety. Elektromagnety budou dále rozebrány v další kapitole. Stator se skládá z feromagnetického svazku tvořeného elektrotechnickými plechy a z trojfázového vinutí uloženého v drážkách.

Při pohybu se aktivní část motoru neustále zmenšuje. Je tedy potřeba prodloužit buď primární, nebo sekundární část. Můžeme tedy lineární motory rozdělit do dvou kategorií.

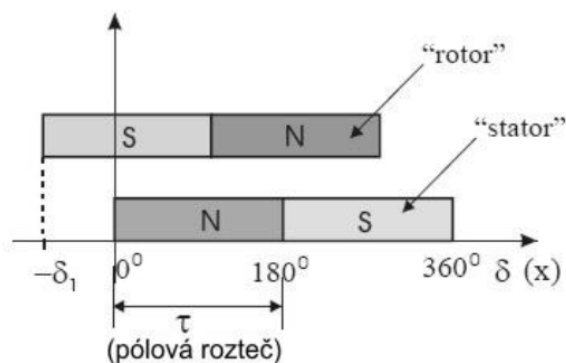
- Stroj s prodlouženou statorovou (primární) částí, tedy stroje s krátkým rotorem
- Stroj s prodlouženou rotorovou (sekundární) částí, tedy stroje s krátkým statorem

Rozlišení, kdy je jaký druh motoru vhodné použít, určujeme podle aplikace, pro kterou je navrhnut. Pro dopravní systémy se používá lineární motor s krátkým rotorem. Ekonomicky výhodnější je použití motoru s krátkým statorem, protože izolované vinutí uložené v drážkách jízdní dráhy je náročnější jak na použitý materiál, tak na napájení tratě. Místo uložení statoru je tedy v jízdní dráze, což má značné výhody i nevýhody. Jednou z hlavních výhod je lehčí kabina vozidla, protože nenese motor. Nevýhodou zde bude především použití značného množství materiálu. Z hlediska konstrukce je nutno poznamenat, že stator je členěn do více úseků. Jednotlivé úseky jsou zvlášť napájeny, aby docházelo k co nejefektivnějšímu provozu a ztráty byly co nejnižší. Napájen je určitý úsek, po kterém se vozidlo pohybuje. Vinutí je uloženo po obou stranách jízdní dráhy, což má za následek snížení přitažlivé síly. Přitažlivá síla je také souměrně rozložena do několika bodů po celé délce vozidla, vždy tam, kde se nad statorovým vinutím pohybuje elektromagnet. Snížení, respektive vhodné rozložení přitažlivé síly má za následek zvýšení dynamiky pohybu. [13]

### 5.1.2 Princip činnosti

Důležité poznatky z oblasti principu a funkce lineárního motoru jsou následující. Vzhledem k tomu, že motor nekoná otáčivý pohyb, není tedy vytvořeno točivé magnetické pole, ale postupné pole, které někde začíná a někde končí. Postupující vlna šířící se magnetickou dráhou tedy musí mít uzavřený obvod. K vysvětlení nám poslouží analogie válce se spirálovým pruhem. Jakmile se

válec točí, můžeme pozorovat, že pruhy se pohybují z jednoho konce na druhý, bez toho aniž by bylo zjištěno, kde začínají a kde končí. Pokud budeme pozorovat konce válců, zjistíme, že pruhy odnikud nepřicházejí a ani nikam nepostupují.



**Obr 5.2** Princip působení lineárního synchronního motoru [17]

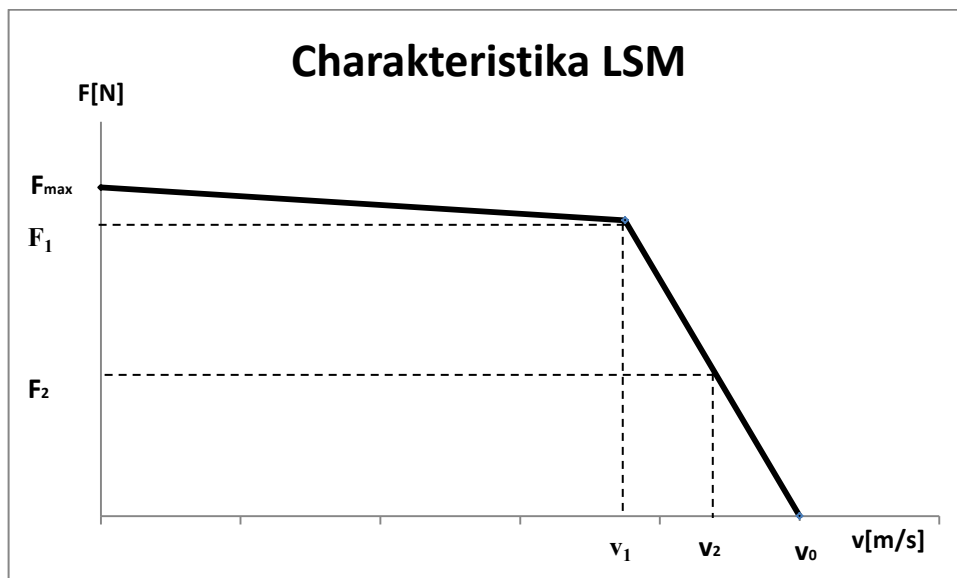
Princip lineárního synchronního motoru je stejný jako u točivého synchronního motoru. Rozdíl je pouze v tom, že se nevytváří točivé magnetické pole, ale pole postupné. Stator je napájen 3-fázovým proudem, který vybudí magnetické pole. Proudů jsou posunuty o 240° elektrických ve sledu fází. Rotor napájený z cizího zdroje (baterie umístěná ve vozidle) vybudí v magnetickém obvodu magnetické pole. Vzhledem k tomu, že rotor je tvořen stejnosměrným elektromagnetem vytvoří neměnné magnetické pole. Magnetické pole statoru je díky střídavému 3-fázovému proudu proměnné a tím, že je stator v lineární poloze, tak vytváří postupné magnetické pole. Postupující magnetické pole je v interakci s magnetickým polem rotoru a vyvolá pohyb vozidla (reakce kotvy). Dříve, než dojde k napájení statoru, je třeba vozidlo přitáhnout k jízdni dráze. Přitáhnutí vozidla k jízdni dráze vyvolá stejnosměrný elektromagnet. Magnetický tok elektromagnetu je řízen budícím proudem a uzavírá se magnetickým obvodem přes vzduchovou mezeru. Čím je vzduchová mezeru menší, tím menší budící proud je třeba k vyvolání stejně velkého magnetického pole. Označení synchronní nese tento motor z důvodů synchronní rychlosti postupného magnetického pole, které je vyvoláno 3-fázovým statorovým proudem a rychlosti pohybu vozidla nad tratí, tedy rotorem. Změnou frekvence statorového proudu můžeme vlak řídit (5.1.). Zvýšením frekvence dosahujeme akcelerace a naopak snižováním frekvence vlak zpomaluje, respektive pro dynamičtější brždění otočíme směr procházejícího proudu statorovým vinutím. Při rozjezdu vlaku je vyvoláno silné magnetické pole statoru, které v interakci z vybuzeným magnetickým polem rotoru vyvolá silnou magnetickou vazbu. Magnetická vazba se snižuje s rychlostí pohybu, tedy odpadá nutnost vyvolávat tak silné magnetické pole statoru jako při rozjezdu.

Rychlost lineárního motoru je dána vztahem.

$$v_s = 2 \cdot w \cdot f \quad (5.1.)$$

Kde  $v_s$  je lineární synchronní rychlost  
 $f$  frekvence  
 $w$  rozteč mezi cívkami

Z uvedeného vztahu vyplývá, že rychlost motoru nezávisí na počtu pólů, ale na rozteči pólů. Rychlost můžeme řídit pouze frekvencí, jelikož rozteč mezi cívkami je vždy konstantní a je navrhována při konstrukci jízdní dráhy.[24]



**Obr 5.3** Grafická závislost síly na rychlosti pohybu – charakteristika LSM

Charakteristika LSM je naznačena na obr 5.3. Závislost síly na rostoucí rychlosti je nelineárně klesající. Respektive lineární pro určité úseky. V oblasti nízkých rychlostí až do rychlosti pro dosažení krátkodobého zatížení ( $F_1, v_1$ ) - přechod špičky (např. při rozběhu) je charakteristika pomalu klesající, tedy s velkou změnou rychlosti se výsledná síla mění minimálně. V bodě, který je navrhnut pro krátkodobé zatížení ( $F_1, v_1$ ) se charakteristika začíná lámat s větší směrnici. Od tohoto bodu nastává ekonomičtější provoz, protože klesá síla potřebná ke zrychlení. Síla má analogii proudu a tedy můžeme na ose y přibližně uvažovat proud. Jedná se o proud nutný k překonání rozběhu a následně jeho charakter ve vysokých rychlostech. Zatížení motoru souvisí s oteplením, proto je nutné, aby se motor pohyboval ve strmé části charakteristiky (pracovní oblast). Dlouhodobé zatížení LSM je dáno parametry ( $F_2, v_2$ ). Pod tímto bodem je motor provozován nejbezpečněji z hlediska přetížení a tedy i přehřátí. Teoretická rychlost je zaznačena jako  $v_0$ . Nad touto rychlostí již není třeba motor napájet. [14], [15]

**Tab 5.1** Parametry lineárního motoru pro Transrapid TR-06 [25]

maximální tahová síla	85 kN
maximální napětí	4250 V
maximální proud	1200 A
rozsah frekvence	0 – 215 Hz
Rozteč mezi cívkami	258 mm
Kabelové vedení	Cu – 150 mm <sup>2</sup> a Al – 300 mm <sup>2</sup>
Účinnost motoru (při 400km/hod)	93%

## 5.2 Elektromagnet

Konstrukčně je elektromagnet nelineární parametrický magnetický obvod s proměnnou délkou vzduchové mezery. Patří do kategorie reluktančních strojů, protože se změnou délky vzduchové mezery dochází ke změně magnetické vodivosti mezery. Z pohledu principu lze říci, že se jedná o formu magnetu, která k vybuzení magnetického pole potřebuje elektrický proud. Velikostí proudu můžeme řídit velikost magnetického pole. Elektromagnety dělíme podle proudu, který protéká cívkou na stejnosměrné a střídavé. V soupravách maglevu je použit stejnosměrný elektromagnet a napájení je z baterie umístěné přímo ve vozidle.

### 5.2.1 Konstrukce

Konstrukční celky elektromagnetu tvoří magnetický obvod, zpravidla s velkou magnetickou vodivostí a elektrický vodič, který je navinut okolo magnetického obvodu. Magnetický obvod je uzavřená cesta magnetického toku v elektromagnetu nebo elektrickém stroji. Pokud nemusí být některá část obvodu pohyblivá, je celý obvod ze železa. Příkladem může být magnetický obvod transformátoru nebo přídržných elektromagnetů. Pokud je nutné, aby se některá část obvodu pohybovala, vznikají v obvodu vzduchové mezery. Velikosti vzduchových mezer se volí tak, aby byly co nejmenší, protože spotřebovávají mnoho budícího proudu. Vzduchové mezery jsou u všech pohybových elektromagnetů a u točivých elektrických strojů. Při návrhu elektromagnetu je potřeba zjistit rozměry magnetického obvodu. Základní zákon magnetického obvodu je podle vztahu (5.2), závislost magnetomotorické síly  $F_m$  na indukčním toku  $\phi$  a magnetickém odporu  $R_m$ .

$$F_m = \sum U_M = \phi \sum R_m \quad (5.2)$$

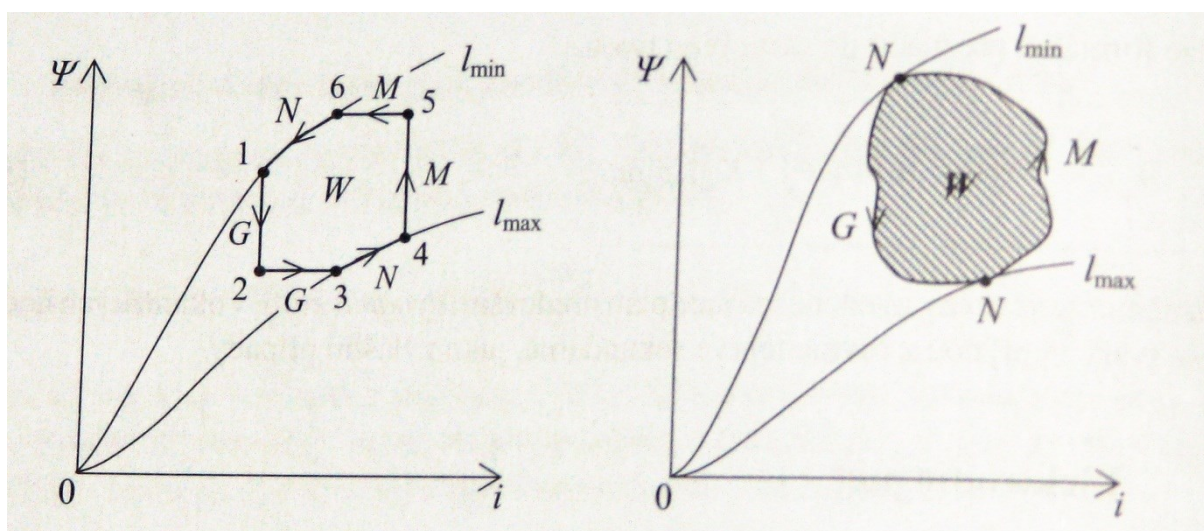
Ve vztahu (5.2) je uvedena suma magnetického odporu, tedy magnetický obvod nebývá zhotoven z jednoho kusu materiálu. Nejčastěji tělem obvodu bývá litá ocel a vodič je navinut v drážkách dynamoplechů. Další nejvíce podstatný odpor způsobuje vzduchová mezera.

### 5.2.2 Princip

Stručný princip elektromagnetu v závislosti na změně vzduchové mezery bude popsán z hlediska principu přeměny energie. K popsání principu nám poslouží obr 5.4, na kterém můžeme vidět závislost proudu na magnetickém toku. Při zvětšování vzduchové mezery klesá spřažený magnetický tok, přestože proud je konstantní. V konečné fázi roste proud, zatímco magnetický tok je konstantní. Vzhledem k tomu, že vykonáváme pohyb proti směru síly, pracuje elektromagnet v generátorovém režimu. Stroj přeměňuje mechanickou energii na elektrickou a vrací ji do napájecí sítě. Jakmile zastavíme zvětšování vzduchové mezery, elektromagnet nekoná mechanickou práci. Proud i magnetický tok rostou podle magnetizační křivky a zvětšuje se energie magnetického pole, která je odebírána ze zdroje. Se zmenšením vzduchové mezery magnetický tok roste a proud zůstává konstantní. V konečné fázi průběhu se zmenšuje magnetický tok při konstantním proudu. Pohyb je ve směru působící síly a stroj se nachází v motorovém režimu, koná mechanickou práci a odebírá přitom elektrickou energii z napájecího zdroje. Po dokončení cyklu stroj vykonal užitečnou



mechanickou práci, kterou můžeme graficky vyjádřit jako plochu vymezenou mezi dvěma křivkami v grafu (obr 5.4.). Pokud se pohybujeme po hysterezní křivce (neměníme vzduchovou mezeru), konáme neúčinnou práci, která je přeměněna v teplo. V reálném případě však levitační elektromagnet neustále vyrovnává velikost vzduchové mezery, aby byla co nejvíce konstantní. Nenastává tedy stav, kdy by nedocházelo ke změně mezery.



**Obr 5.4** Závislost spřaženého magnetického toku na proudu budícím vinutím elektromagnetu [16]

Elektromagnety plní 3 základní funkce v levitačním systému, které jsou na sobě nezávislé:

- levitují vozidlo
- jsou součástí pohonu vozidla
- konstrukční – je v nich uloženo vinutí lineárního generátoru

Elektromagnety v rychlostech po rozjezdu (tedy nad 100km/hod) se chovají jako lineární generátor a dobíjí baterie uložené ve vozidle. Jde o princip magnetické indukce, kdy se ze statoru indukuje napětí do rotoru a indukované napětí v rotoru vyvolá proud tekoucí závity elektromagnetu. Proud poté dobíjí baterie. [16]

### 5.2.3 Síla ve vzduchové mezeře

Mechanická práce se v závislosti na vzduchové mezeře vyvíjí dle vztahu.

$$dW_{mech} = F \cdot dl \quad (5.3)$$

Jedná se o diferenciální rovnici, kdy při změně vzduchové mezery se mění mechanická energie. Platí také zákon zachování energie.

$$dW_{mech} + dW = 0 \quad (5.4)$$

Součet přírůstku mechanické energie a energie dodávané ze zdroje musí být roven 0. Můžeme tedy vyjádřit závislost síly na změně energie a délce vzduchové mezery.

$$F = \frac{dW_{mech}}{dl} = -\frac{dW}{dl} \quad (5.5)$$

Vliv v železe můžeme pro zjednodušení zanedbat, protože železo je vodivější než vzduchová mezera a tedy můžeme předpokládat, že veškerá energie se soustředí do vzduchové mezery. Tímto obvod značně linearizujeme a můžeme určit energii magnetického pole z rovnice (5.6).

$$W = \frac{1}{2} \cdot i^2 L = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l} \quad (5.6)$$

$S_{Fe}$ ... průřez železa a tedy i plocha vzduchové mezery

Sílu poté určíme z rovnice (5.5) a provedeme matematické operace.

$$\begin{aligned} F &= -\frac{dW}{dl} = -\frac{d}{dl} \left( \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot L \right) = -\frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{d}{dl} (L) = -\frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{d}{dl} \left( N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l} \right) = \frac{1}{2} i^2 \cdot \left( N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l} \right) = \\ &= \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{L}{l} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Rovnici můžeme upravit do konečného tvaru, pomůžeme si rozšířením zlomku parametrem L.

$$F = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{L}{l} = \frac{1}{2} \cdot \frac{i^2 L^2}{Ll} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Psi^2}{Ll} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(NBS_{Fe})^2}{N^2 \mu_0 S_{Fe}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot S_{Fe} \quad (5.8)$$

Ze vztahu (5.9) můžeme vyjádřit mechanický plošný tlak vznikající ve vzduchové mezeře.

$$p = \frac{F}{S_{Fe}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \quad (5.9)$$

Tlak určující vztah (5.9) je tlak ve vzduchové mezeře. Tento tlak může být po rozjezdu vlaku dosáhnout i aerodynamickými účinky a vlak se tedy nemusí vznášet jen na magnetickém polštáři, ale i na vzduchovém. Proudící vzduch mezi podvozkem vlaku a dráhou napomáhá k levitační činnosti elektromagnetu. Zde musíme uvažovat stavovou rovnici plynu

$$p \cdot V = R \cdot T \rightarrow p = \frac{R \cdot T}{V} \quad (5.10)$$

Z uvedeného výrazu je patrné, že tlak vzduchu proudícího mezi vlakem a dráhou je přímo úměrný odporu (R) a teplotě (T) vzduchu, nepřímo úměrný objemu stlačeného vzduchu (V).[16]

#### 5.2.4 Návrh stejnosměrného elektromagnetu

Při návrhu elektromagnetu je třeba vycházet z požadavků na provoz, které jsou vstupními hodnotami a tedy zadáním. Pravidelně je dán požadavek na celkový tah F, maximální zdvih  $\delta$  a napětí U budícího stejnosměrného proudu. Výsledkem by mělo být určit rozměry jádra a cívky tak, aby vyhovovaly požadavkům a aby nedocházelo k ohřevu nad povolenou mez. Ohřev elektromagnetu souvisí s dobou zatížení a taky s provozem. [17]

Průměr jádra je možno určit podle vztahu (4.10). Předpokládá se válcové jádro a trvalé zatížení.

$$d = 0,18\sqrt[5]{F\delta^2} \quad (5.11)$$

Efektivní plocha pólů.

$$S_\delta = \frac{\pi}{4}d^2\varepsilon^2 \quad (5.12)$$

$\varepsilon$  je činitel rozšíření pólů, určuje ho následující vztah

$$\varepsilon = 1 + \frac{\delta}{d} - 0,5\left(\frac{\delta}{d}\right)^2 \quad (5.13)$$

Činitel rozšíření pólů nese informaci o zakřivení indukčních čar mezi póly. Při malé vzduchové mezeře (vzduchová mezera je menší než průměr jádra) jsou indukční čáry přímočaré, při větší dochází k vyboulení indukčních čar do stran. Pro vzduchové mezery  $\delta < d$  lze skutečné pole pro výpočet nahradit homogenním polem, kde empirická hodnota  $\varepsilon$  je dána vztahem (5.13).

Indukci ve vzduchové mezeře určuje následující vztah (5.14).

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F}{40000 \cdot S_\delta}} \quad (5.14)$$

Pro magnetické napětí ve vzduchové mezeře platí.

$$U_\delta = 0,8 \cdot 10^6 B_\delta \delta \quad (5.15)$$

Určení magnetomotorické síly. Koeficient 1,1 až 1,3 se určuje v závislosti na velikosti vzduchové mezery. Čím je vzduchová mezera menší, tím vyšší koeficient je třeba aplikovat. Hradí ztráty v železe.

$$F_m = (1,1 \text{ až } 1,3)U_\delta \quad (5.16)$$

Průřez vodiče budící cívky.

$$S = \frac{\delta F_m l_z}{U} \quad (5.17)$$

Příměř délka závitu.

$$l_z = 2\pi d \quad (5.18)$$

Proud pak je.

$$I = S\sigma \quad (5.19)$$

Počet závitů cívky.

$$N = \frac{F_m}{I} \quad (5.20)$$

Délka cívky.

$$l = (2 \text{ až } 3)d \quad (5.21)$$

Indukce na čele pólu.

$$B_{Fe} = \varepsilon^2 B_\delta \quad (5.22)$$

## **6 Budoucnost dopravy na bázi magnetické levitace**

Problematika budoucnosti dopravy je klíčovým řešením moderních technologií a vývoje. Nutnost přepravovat se rychleji, bezpečněji, ekonomicky a environmentálně efektivněji zapřičiňuje vývoj moderních technologií v dopravě. Dopravu můžeme rozdělit na pozemní a nadzemní. Modernizace probíhá ve všech typech dopravy, přičemž nejmodernější a nejnovějším typem je doprava nadzemní tedy letecká. Letecká doprava má hlavní výhodu v rychlosti a je vhodná především na velké vzdálenosti, kde se stává stále nenahraditelnou. Nevýhodu ale má z pohledu ekologie v použití spalovacích motorů a ropných produktů, jako jsou spalovací směsi. Částečně také v bezpečnosti, která je dána pohybem letadla ve vysokých nadmořských výškách a možností pádu. Lze tedy říci, že bezpečnější pohyb bude mít pozemní typ dopravy. Pozemní typ skýtá nejrozličnější typy dopravy. Vysokorychlostní železniční doprava je nejvíce konkurence schopná k letecké dopravě a to především na kratší a středních vzdálenostech. Vysokorychlostní železnice je plně elektrizovaná soustava, čímž se stává ekonomicky úspornější a na okolní prostředí šetrnější než doprava na fosilní paliva. Postupným vývojem se měnila technologie pohonů a tím i maximální dosažitelná rychlost. Omezení nastalo až v případě moderních rychlovlaků, kde bylo zjištěno, že mimo odpor vzduchu, jenž brzdil soupravu na kolejích, to byla i adheze. Odpor vzduchu by bylo možno eliminovat jedině pohybem vlaku ve vakuu, ale tohle je otázka dalšího budoucího vývoje. Zatímco adhezi můžeme eliminovat bezkontaktním provozem, tedy vznášením. Vývoj v oblasti železniční dopravy je rozvíjen dvěma směry a to podle pohybu vlaku po železnici:

- a) Konvenční - fyzický kontakt kola a kolejnice
- b) Nekonvenční - levitování vlaku nad magnetickou dráhou

Následně se zaměřím na vývoj a budoucnost právě nekonvenční, magneticky levitované železniční dopravy. V nedávné minulosti by představa o levitujících vlcích, ale nejen vlcích, ale i tělesech obzvláště značných rozměrů a hmotnosti, byla označena jako sci-fi. Zkoumáním elektromagnetických jevů se postupně dospělo k fyzické realizaci a zapojení do provozu. Magnetická levitace nabízí spoustu nových možností v dopravě a v jejím následném vývoji.

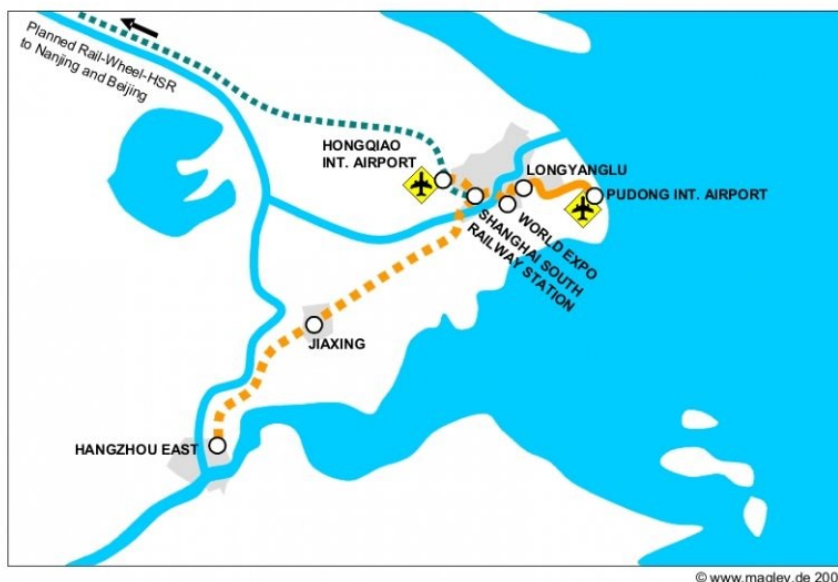
### **6.1 Projekty v provozu**

V dnešní době existují jen tři uskutečněné projekty, kde se provozují magneticky levitované vlaky. Vlaky Transrapid jsou pro přepravu cestujících využívány pouze v Šanghaji. Další dvě funkční dráhy slouží jako testovací okruhy, přičemž jeden se nachází v Evropě, konkrétně v německém Emslandu a druhý v Japonsku. V Evropě se testuje levitační princip EMS a v Japonsku princip EDS.

#### **6.1.1 Šanghaj**

Zatím jediná provozovaná trať pro komerční využití je spoj mezi centrem města Šanghaje a letištěm. Jízdní dráha dlouhá 30,5 km spojuje mezinárodní letiště Pudong se stanicí metra Longyang Road. Výstavba začala v roce 2001 a dokončena byla na podzim roku 2003. 12. listopadu 2003 byla při nekomerční zkoušce dosaženo rychlosti 501km/hod, což byla nejvyšší dosažená hodnota principu EMS. 1. ledna 2004 byl spuštěn komerční provoz a s maximální

rychlostí na trati 431km/hod. Linka zajišťuje pravidelnou dopravu v intervalu 15 minut. Vozidlo, kterým je trať obsluhována je produktem společností Siemens a ThyssenKupp. Jedná se o princip Transrapid, který je vyvíjen právě těmito dvěma společnostmi. V budoucnu je plánované rozšíření do starého letiště Hong Qiao, a v další fázi pak až do města Hangzhou. [18]



**Obr 6.1** Magnetická dráha v Šanghaji s naznačeným plánovaným rozšířením

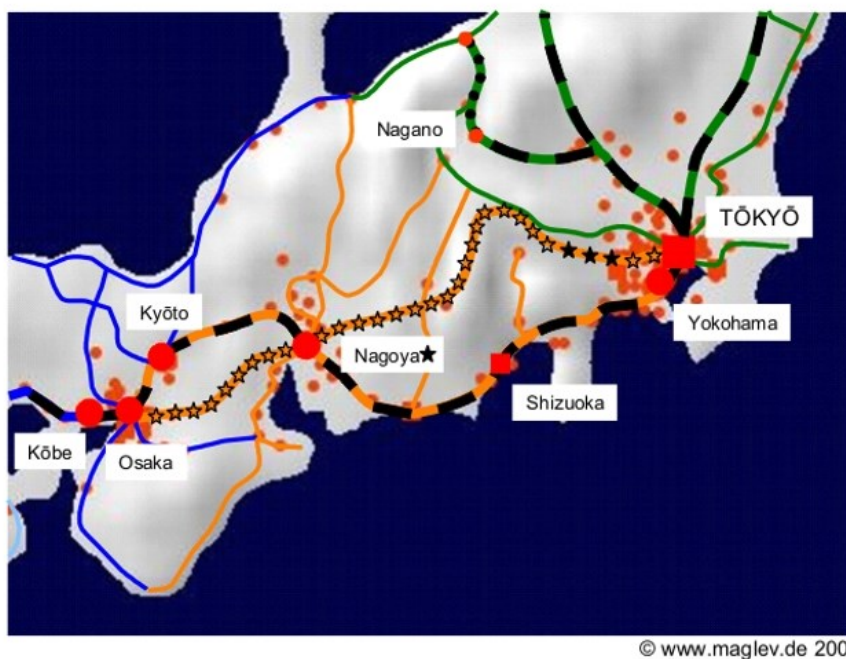


**Obr 6.2** Transrapid 08(Europa) na trati v Šanghaji

## 6.2 Plánované projekty v Asii

### 6.2.1 Chūō Shinkansen

Trať dlouhou 514 km, chce Japonsko vybudovat do roku 2045. Japonská vláda investuje do projektu 9 bilionů jenů. Trať protne metropole Tokyo, Nagoya a Osaka. Výstavba začala v květnu roku 2011 a přibližné dokončení výstavby první části traťového koridoru bude v roce 2027 do města Nagoya. Celková trať až do Osaky má být dokončena v roce 2045. Vlak by se na trati měl pohybovat průměrnou rychlostí 500km/hod. Vzdálenost mezi městy Tokyo a Nagoya by měla být uražena za 40 minut a celková doba jízdy mezi Tokyem a Osakou by měla trvat přibližně 67 minut. V současné době je postavený pouze úsek testovací tratě Yamanashi v délce 18,4 km, který je prodlužován na 42,8 km. Tento úsek dnes zajišťuje Tokaido Shinkansen. Jedná se o klasickou vysokorychlostní železniční trať, která je v dnešní době vytížena na hranici své kapacity. V budoucnu se tento úsek stane součástí rychlotrati Tokyo-Osaka. Součástí zkušebního úseku je depo, kde dochází k přechlázování supravodivých magnetů, jejich plnění kapalným heliem, nabuzení a odmagnetizování. Zde také dochází ke zkapalnění vypařeného plynného helia a jeho doplnění. [19], [20], [21]



*Obr 6.3 Magnetická dráha v Japonsku s naznačeným plánovaným rozšířením*

### 6.2.2 Vakuové vlaky

Představa vlaku letícího rychlostí 1000km/hod je v dnešní době stále nepředstavitelná, ale již existuje řešení jak dosáhnout této rychlosti. Řešení nacházíme ve vakuovém tubusu, ve kterém se vlak může pohybovat bez odporu vzduchu rychlostmi i nad 1000km/hod. Odpor vzduchu je již u

magneticky levitovaných vlaků poslední velkou překážkou, která omezuje rychlost rychlovlaku. Projekt této myšlenky je stále pouze na papíře, jelikož čelí stále řadě nedostatků, jako je například zabrzdění vlaku v případě výpadku elektřiny. Problém zůstává především v enormní počáteční investici do výstavby. Výstavba Maglev železnice je i tak už dosti drahá a vakuový tubus by trať prodražil ještě minimálně o 3 miliony dolarů na kilometr. Jestliže se podaří vyřešit nedostatky projektu pro fyzickou realizaci a provoz, tak by se mohlo začít s výstavbou do 10 let. Zrealizovat provoz vakuovými vlaky má v plánu Švýcarsko a Čína. [21], [22],

## **6.3 Plánované projekty v Evropě**

### **6.3.1 Hamburg – Berlín**

Největším projektem a zároveň prvním, který se dostal do realizace, byla jízdní dráha napříč Německem. Vzhledem k tomu, že objev EMS byl patentován německému vědci a výroba vlaků principu Transrapid je produkována společností ThyssenKupp a Siemens (obě německé), tak si Německo chtělo zachovat celosvětové prvenství i ve fyzickém provozu. Trasa dlouhá 284 km by měl Transrapid 08 urazit průměrnou rychlostí 300km/hod za necelou hodinu. Plánovaná trasa vede přes Berlín, Spandau, Schwerin, Billwerder Moorfleet a Hamburg. 60% plánované trasy vede podél dálnice A24 a zbývající část v tunelech, mostech a zářezích mezi terénními nerovnostmi. Rok 2005 byl předpokládaným rokem provozu. Výstavba trati ztroskotala již v zárodku realizace a projekt byl definitivně zastaven. Důvodem zde byli enormní náklady a nejistá návratnost z provozu. Vyrobené vlaky Transrapid 08 byly prodány Číně.[12]

### **6.3.2 Londýn – Peking**

Spojení Evropy s Asií pozemní dopravou se stává čím dál významnější vzhledem k růstu cen ropy. Dosavadní spojení je zatím pomocí letecké nebo lodní dopravy. Obě dopravy jsou závislé na ropě, je tedy nezbytné přejít na alternativní způsob dopravy. Alternativní zdroj je nejvíce významný ve formě elektřiny a tedy pozemní dopravě poháněné elektřinou. Význam získává vysokorychlostní železniční doprava. Zatím jediný plánovaný projekt je na spojení dvou významných měst a to Londýna a Pekingu s mezi zastávkami ve významných evropských a asijských metropolích. Předpokladem je, že do roku 2020 by mělo dojít ke spojení těchto dvou lokalit pomocí vysokorychlostní železnice. Zda půjde o běžnou vysokorychlostní trať nebo o magneticky levitovanou trať ještě není jasné. Spojení by mělo být využíváno především jako nákladní doprava. V tomto případě mírně ztrácí magneticky levitovaný systém, protože je omezen nákladem maximálně 15 tun na jeden vlakový sektor. Úsek dlouhý téměř 8000 km by měl být uražen za 2 dny a to průměrnou rychlostí 300km/hod. Předpokládaná trasa povede přes Sibiř do Petrohradu s tím, že v Petrohradě by mohlo dojít k rozdělení na dva úseky. První úsek je prozatím zamýšlen z Petrohradu přes Polsko do Londýna. Druhý úsek je zamýšlen z Petrohradu do Kyjeva a dále přes jih Evropy do Španělska.[26]

## **6.4 Rozvoj supravodivých materiálů**

Supravodivý materiál vykazuje nulový odpor při průchodu elektrického proudu. Dosáhnout supravodivosti lze silným podchlazením na teplotu absolutní nuly (-273,15 °C). Téměř každý



vodivý materiál lze přivést do supravodivosti. Supravodivost je ideální vlastností každého vodiče. Problémem je chlazení. Na chlazení se používá nejčastěji tekutý dusík nebo helium. Materiál se musí uzavřít v kryostatu, kde se udržuje velmi nízká teplota.

Supravodivé materiály jsou nutné pro levitační systém EDS, který je využíván v Japonsku. Japonci využívají tento systém z toho důvodu, že na jejich území vznikají časté a silné seismické otřesy. Systém EDS se vyznačuje především velkou vzduchovou mezerou (15 cm) mezi podvozkem vozidla a jízdní dráhou. Na udržení magnetické vazby při takové vzduchové mezeře je třeba použít supravodivých vodičů, protože musí snést velké proudy. Vývoj supravodivých materiálů umožňuje širší využití. Experimenty se neustále provádí s různými typy materiálů a slitin a snahou je dosáhnout supravodivosti při co nejvyšší teplotě a udržet supravodivý stav při pokojové teplotě. Požadavkem je tedy co nejmenší energetická náročnost pro vytvoření a udržení supravodivosti. Posledním experimentem, který byl proveden týmem doktora Pabla Esquinaziho bylo přivedení grafitu do supravodivosti. Zvláštností toho to principu bylo, že grafit nebyl podchlazen, ale naopak smícháním zrn grafitu s destilovanou vodou a pečením na 100°C se stal grafit supravodivý. Tento experiment zatím zůstává v laboratořích a zkoumá se, po jak dlouhou dobu udrží při pokojové teplotě supravodivost. Lze jen s napětím očekávat, kde se vývoj zastaví, jelikož získat supravodivý materiál levným způsobem a bez potřeby ho držet na teplotě blízké absolutní nule by znamenalo revoluci v technickém pokroku stojícím na supravodičích. [23]

## **7 Závěr**

V bakalářské práci je zpracována problematika dopravních systémů na bázi magnetické levitace se zaměřením na dopravní systém Transrapid.

První kapitola se zabývá chronologickým vývojem magnetické levitace v dopravě od prvních pokusů s nadlehčováním až k reálným funkčním levitujícím vlakovým soupravám.

Druhá kapitola popisuje jednotlivé druhy magnetické levitace z fyzikální podstaty. Je zde popsáno, jak lze magnetickou levitaci dosáhnout třemi dnes nejčastěji používanými principy, které se nejvíce zdokonalují.

Ve třetí kapitole je popsán systém Transrapid. Jedná se o jediný provozovaný systém, pracující na bázi magnetické levitace, který slouží k přepravě cestujících. Jsou zde uvedeny parametry vlakové soupravy, dále pak parametry magnetické dráhy a srovnání s konvenční železniční dopravou.

Čtvrtá kapitola obsahuje rozbor elektrických částí vlakové soupravy a jízdní dráhy. Podrobněji se zabývá Lineárním motorem konstrukcí a principem a zvlášť je uveden elektromagnet jako sekundární díl (rotor) lineárního motoru. Součástí kapitoly je i postup návrhu stejnosměrného elektromagnetu.

Poslední kapitola se zabývá budoucností magnetické levitace v dopravě. Uvedeny jsou zde projekty, které se uskutečnily a jsou v reálném provozu a projekty plánované. Dále je uveden pokrok ve vývoji supravodivých materiálů, které jsou nedílnou součástí některých magneticky levitovaných systémů.

Doprava levitující nad zemským povrchem není běžnou záležitostí ani po 70. letech vývoje od prvního funkčního modelu. Čelí spoustě překážkám, které znemožňují rychlý nástup do reálného provozu. Důvod, proč by měla doprava na této bázi získat větší uplatnění, je především v moderních technologiích, které jsou vyvíjeny pro ekologičtější a ekonomičtější provoz. Otázka ekologie je částečně protichůdná, jelikož k výrobě elektrické energie je zapotřebí transformovat přeměnitelnou formu energie v elektrickou. Největším zástupcem na poli výroby elektrické energie jsou stále tepelné elektrárny, tedy elektrárny, které se podílejí na znečišťování ovzduší. Ačkoliv problém vypadá jako začarovaný kruh, východiskem by zde mohly být alternativní zdroje elektrické energie. Další důvod je dán především rychlostí a provozu této dopravy při zachování vysoké bezpečnosti. Patří mezi nejrychlejší pozemní dopravu a dalo by se bez nadsázky říci, že na krátkých až středních vzdálenostech je bezkonkurenční po ekonomické, rychlostní i bezpečnostní stránce. Tím, že se jedná o téměř bezúdržbovou dopravu v porovnání s běžnou dopravou a díky bezkontaktnímu provozu získává levitující doprava výhodnější postavení mezi konkurencí. Velkou překážkou, která brání rozvoji maglevu je cena výstavby tratí. Většina rozvojových zemí se při modernizaci železniční infrastruktury přiklání k opravám, či rekonstrukcím stávajících vlakových koridorů a v případě zrychlení dopravy, k výstavbě vysokorychlostních tratí, které jsou stále několikanásobně levnější než výstavba magnetické jízdní dráhy. Čína je ekonomickou velmocí ve světě a dokazuje to nejen rozvojem klasické železnice, ale právě i rozvojem moderních trendů v železniční dopravě, jako např. provozováním jediné magnetické dráhy pro přepravu cestujících. Další zemí, kde rozvoj maglevu má zelenou, je Japonsko. Japonsko má oproti Číně zásadní problém v poloze svého území. Území se rozkládá na dvou litosférických deskách, které jsou neustále v pohybu a dochází zde tedy k častým zemětřesením. Japonsko se k tomuto problému

postavilo tím, že vyvíjí magnetickou levitaci založenou na odlišném principu než soupravy, které jsou provozovány v Číně. Nevýhodu mají především v použití supravodivých materiálů, které potřebují složité a drahé zařízení k udržení supravodivého stavu. Nicméně vývoj supravodivých materiálů se v posledních letech rychle a neustále vyvíjí.

Porovnávat tyto dva nejvíce rozvíjející se systémy mezi sebou je velmi obtížné a objektivní hodnocení je těžké. Přesto mým názorem je, že technologie Transrapid je v nynějším stádiu propracovanější a tedy má vyšší šanci pro uplatnění v dopravě. Budoucnost maglev dopravy má spíše horší předpoklady, vzhledem k enormním nákladům na výstavbu dráhy, ale rozhodně je to cesta správným směrem, která jistě získá uplatnění ať v této či jiné vývojem pokročilé podobě.

Rozvinutí problematiky magnetické levitace může spočívat např. v modelování magnetických polí a získání tak lepšího přehledu jak zefektivnit spotřebu, řízení a ztráty ve formě nevyužití energie magnetického pole. Kromě modelování by mohl být doplněn matematický výpočet dle Maxwellových rovnic a podání tak přehlednějších a názornějších výsledků z pohledu interakce magnetického a elektrického pole. Výsledkem by poté mohlo být zefektivnění některého z principů magnetické levitace. Příkladem může být vhodnější uspořádání Halbachovy soustavy permanentních magnetů s čím přišel prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc. ve spolupráci s Doc. Ing. Bohuš Ulrych, CSc.

## **Literatura:**

- [1] MAYER, D.: *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (2dokončení)*, [online]. 2008 [cit. 2012-12-22].  
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36502.pdf/36434.pdf>
- [2] MAYER, D.: *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1)*, [online]. 2007 [cit. 2012-12-22].  
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36434.pdf>
- [3] MAYER, D.: *Magnetická levitace a její využití* [online]. 2003 [cit. 2012-12-22].  
Dostupné z: [www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf)
- [4] REICHL, J. *Encyklopedie fyziky*. [online]. 2013 [cit. 2013-2-26].  
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/423-supravodivost#>
- [5] PALEČEK, J.; PALEČEK, L.: *Transrapid – nová dimenze v dopravní technologii*. Nová železniční technika, 1998, roč. 6, č. 1, s. 2-4.
- [6] FYZMATIK, *Levitující lifter*. [online], 2009, [cit. 2013-2-26].  
Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/120382-levitujici-lifter.html>
- [7] MAYER, D.; Ulrych, B.: *Halbachova soustava magnetů a její modifikace*. [online], 2009, [cit. 2013-2-26].  
Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/45.pdf>
- [8] MAYER, D.: *Elektrodynamika v Energetice*, 1. Vyd, Praha: BEN, 2005, 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
- [9] TRANSRAPID [online], 2006, [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.transrapid.de/>
- [10] *High-Tech for „Flying on the Ground“*. [online], 2006, [cit. 2012-11-11].  
Dostupné z: [http://www.thyssenkrupp.com/documents/transrapid/TRI\\_Flug\\_Hoehe\\_e\\_5\\_021.pdf](http://www.thyssenkrupp.com/documents/transrapid/TRI_Flug_Hoehe_e_5_021.pdf)
- [11] *OTN systém*. [online], 2004, [cit. 2012-01-12].  
Dostupné z: <http://www.otn.be/applications/metros-lightrail-railways>
- [12] PALEČEK, J.: *Transrapid – Europa*. Odborná práce
- [13] *Technika a trh*. [online], 2004, [cit. 2012-11-12].  
Dostupné z: [http://www.hiwin.cz/pdf/clanek\\_o\\_linearnich\\_motorech\\_-\\_technika\\_a\\_trh.pdf](http://www.hiwin.cz/pdf/clanek_o_linearnich_motorech_-_technika_a_trh.pdf)
- [15] KRAMÁŘ, O.: *Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnitřním buzením*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 79 l., 14 l. příl., Vedoucí diplomové práce Singule V.

- [16] PATOČKA, M.: *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdové elektrotechnice*, 1. vyd. Brno: VUTUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [17] CIGÁNEK, L.; BAUER M.: *Elektrické stroje a přístroje*. 2. Vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 639 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [18] MAGNETBAHNFORUM. [online], 2007, [cit. 2013-01-10].  
Dostupné z: [http://magnetbahnforum.de/index.php?en\\_faf\\_transrapid\\_sha](http://magnetbahnforum.de/index.php?en_faf_transrapid_sha)
- [19] HOŘČÍK, J.: *Japonsko buduje nové rychlotrati Maglev s rychlostí 500 km/h*. [online], 2011, [cit. 2013-02-02].  
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/japonsko-buduje-nove-rychlotrate-maglev-s-rychlosti-500-kmh>
- [20] MAGNETBAHNFORUM. [online], 2007, [cit. 2013-02-02].  
Dostupné z: [http://magnetbahnforum.de/index.php?en\\_faf\\_chuomaglev](http://magnetbahnforum.de/index.php?en_faf_chuomaglev)
- [21] PALÍK, F.: *Progresivní řešení vysokorychlostních železničních vozidel a množství vysokorychlostní železnice v české republice*. [online], 2007, [cit. 2013-02-02].  
Dostupné z: <http://vrt.fd.cvut.cz/data/konference/45tcz.pdf>
- [22] HOŘČÍK, J.: *Čína chce vakuové rychlovlaky s rychlostí až 1000 km/h*. [online], 2011, [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novinky/cina-chce-vakuove-rychlovlaky-s-rychlosti-az-1000-kmh>
- [23] TŮMA, M.: *Návod, jak snadno vyrobit supravodič z tuhy*. [online], 2012, [cit. 2013-03-02].  
Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/navod-jak-snadno-vyrobic-supravodic-z-tuhy>
- [24] WILDI, T.: *Electrical machines, drives, and system*, Prentice-Hall INC, 1997. 814s. ISBN 013367889x
- [25] BINDER, A.: *Linear motors utilization for both maglev and railway vehicles*. Komunikácie – vědecké listy Žilinskej univerzity, 2001, roč. 3, č. 2-3, s. 61-67
- [26] NEMEC, M.: *Vysokorychlostná železnice: Z Pekingu přímo do Londýna pohodlně a rychle*. [online], 2010, [cit. 2013-03-12].  
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novinky/vysokorychlostna-zeleznica-z-pekingu-priamo-do-londyna-pohodlne-rychlo>
- [27] DRÁBEK, J.: *Vysokorychlostní doprava soupravami s magnetickou levitací v Japonsku*. Nová železniční technika, 1997, roč. 5, č. 4, s. 98-101.